

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CAROLINE MARUCHI DE OLIVEIRA

PROGRAMAÇÃO DE CARGA E DESCARGA EM DOCAS UTILIZANDO
PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA E A METAHEURÍSTICA *SIMULATED*
ANNEALING

CURITIBA

2021

CAROLINE MARUCHI DE OLIVEIRA

PROGRAMAÇÃO DE CARGA E DESCARGA EM DOCAS UTILIZANDO
PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA E A METAHEURÍSTICA *SIMULATED*
ANNEALING

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientadora: Profa. Dra. Mariana Kleina

Coorientador: Prof. Dr. Arinei Carlos
Lindbeck da Silva

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

O48p Oliveira, Caroline Maruchi de
Programação de carga e descarga em docas utilizando programação linear inteira e a
Metaheurística Simulated Annealing [recurso eletrônico] / Caroline Maruchi de Oliveira. –
Curitiba, 2021.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Produção, 2021.

Orientadora: Mariana Kleina.

Coorientador: Arinei Carlos Lindbeck da Silva.

1. Cargas e descargas. 2. Modelos matemáticos. 3. Programação linear. I. Universidade Federal
do Paraná. II. Kleina, Mariana. III. Silva, Arinei Carlos Lindbeck. IV. Título.

CDD: 658.7885

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO - 40001016070P1

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **CAROLINE MARUCHI DE OLIVEIRA** intitulada: **PROGRAMAÇÃO DE CARGA E DESCARGA EM DOCAS UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA E A METAHEURÍSTICA SIMULATED ANNEALING**, sob orientação da Profa. Dra. MARIANA KLEINA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 14 de Maio de 2021.

Assinatura Eletrônica

17/05/2021 17:31:38.0

MARIANA KLEINA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

18/05/2021 13:13:00.0

ROBSON SELEME

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

17/05/2021 17:32:48.0

PAULO HENRIQUE SIQUEIRA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

17/05/2021 18:10:22.0

AGNELO DENIS VIEIRA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

RESUMO

Este trabalho mostra o estudo do problema de sequenciamento e programação de caminhões a docas com a inclusão de janelas de tempo para intervalos de parada. O objetivo é propor um modelo matemático de modo a minimizar o tempo dos motoristas dentro das empresas, e apresentar meios de soluções ótimas e subótimas com a utilização de técnicas e algoritmos de Pesquisa Operacional. O trabalho foi estruturado em etapas sequenciais. Primeiramente, foram identificados os métodos e algoritmos mais utilizados para este tipo de problema. Na sequência o modelo matemático foi desenvolvido, implementado computacionalmente nos *softwares* LINGO e Gurobi e validado de acordo com as restrições do estudo de caso. Uma metaheurística baseada no algoritmo *Simulated Annealing* foi implementada em Excel, na linguagem VBA, e utilizada como forma de resolução subótima para problemas maiores que os resolvidos pelo método exato. Experimentos computacionais foram conduzidos para avaliar as performances do modelo e da metaheurística propostos. Os resultados comprovaram a robustez do modelo matemático e da metaheurística propostos, bem como a eficácia da metaheurística, que retornou soluções próximas às ótimas, com GAPS menores que 4%, dentro de tempos computacionais aceitáveis.

Palavras-chave: Programação de caminhões. Chegada de caminhões. Janela de tempo. *Open Shop*. *Simulated Annealing*.

ABSTRACT

This work studies the truck scheduling with the inclusion of time windows for breaks. The aim is to propose a mathematical model in order to minimize the time spent by drivers within companies, and to present exact and approximate solutions with the use of Operational Research techniques and algorithms. The work was structured in sequential steps. First, the most used methods and algorithms for this type of problem were identified. Then, the mathematical model was developed, computationally implemented in the LINGO and Gurobi software's and validated according to the case study conditions. A metaheuristic based on the Simulated Annealing algorithm was implemented in Excel, using VBA language, and used as a form of approximate resolution for problems larger than the ones solved exactly. Computational experiments were conducted to evaluate the performance of the proposed model and metaheuristic. The results proved the robustness of the mathematical model and the proposed metaheuristic, as well as the metaheuristic effectiveness, which returned solutions close to the optimum, with GAPS lower than 4%, within acceptable computational times.

Keywords: Truck scheduling. Truck arrivals. Time window. Open Shop. Simulated Annealing.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ETAPAS DO TRABALHO	34
FIGURA 2 – RELAÇÃO DE HEURÍSTICAS	37
FIGURA 3 – ESQUEMATIZAÇÃO ALGORITMO <i>SIMULATED ANNEALING</i>	44
FIGURA 4 – MÉTODO DE PERTURBAÇÃO MP1	49
FIGURA 5 – MÉTODO DE PERTURBAÇÃO MP2	49
FIGURA 6 – MÉTODO DE PERTURBAÇÃO MP3	49
FIGURA 7 – MÉTODO DE PERTURBAÇÃO MP4	50
FIGURA 8 – MÉTODO DE PERTURBAÇÃO MP5.....	51
FIGURA 9 – GRÁFICO DE GANTT – 5 CAMINHÕES E 5 DOCAS (1 FICTÍCIA)	55
FIGURA 10 – GRÁFICO DE GANTT – 8 CAMINHÕES E 6 DOCAS (1 DOCA FICTÍCIA)	58
FIGURA 11 – COMPARATIVO DE ROTEIROS SOLUÇÃO EXATA E SUBÓTIMA, RESPECTIVAMENTE – 5 CAMINHÕES E 5 DOCAS (1 FICTÍCIA)	62
FIGURA 12 – SOLUÇÃO SA – 8 CAMINHÕES E 6 DOCAS (1 FICTÍCIA)	63

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – TIPOS DE OPERAÇÃO – 7 CAMINHÕES E 5 DOCAS (1 FICTÍCIA)	51
TABELA 2 – TEMPOS DE PROCESSAMENTO – 5 CAMINHÕES E 5 DOCAS (1 FICTÍCIA)	53
TABELA 3 – TEMPOS DE DESLOCAMENTO ENTRE DOCAS	54
TABELA 4 – TIPOS DE OPERAÇÃO	54
TABELA 5 – INSTANTES DE INÍCIO DAS JANELAS DA TEMPO	54
TABELA 6 – DURAÇÃO DAS JANELAS DA TEMPO	55
TABELA 7 – INSTANTE DE TÉRMINO NA ÚLTIMA DOCA DESIGNADA	56
TABELA 8 – TEMPOS DE PROCESSAMENTO – 8 CAMINHÕES E 6 DOCAS (1 FICTÍCIA)	57
TABELA 9 – TIPOS DE OPERAÇÃO – 8 CAMINHÕES E 6 DOCAS (1 FICTÍCIA)	57
TABELA 10 – INSTANTES DE TÉRMINO – 8 CAMINHÕES E 6 DOCAS (1 FICTÍCIA)	58
TABELA 11 – TEMPOS DE DESLOCAMENTO – 8 CAMINHÕES E 6 DOCAS (1 FICTÍCIA)	59
TABELA 12 – COMPARAÇÃO ENTRE OS <i>SOFTWARES</i> DE RESOLUÇÃO EXATA E <i>SIMULATED ANNEALING</i>	61
TABELA 13 – INSTANTES DE TÉRMINO – SOLUÇÃO ÓTIMA E SA – 8 CAMINHÕES E 6 DOCAS (1 FICTÍCIA)	64
TABELA 14 – RESULTADOS <i>SIMULATED ANNEALING</i> PARA PROBLEMAS DE GRANDE DIMENSÕES	65

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 PROBLEMA	10
1.2 JUSTIFICATIVA	11
1.3 OBJETIVOS	12
1.3.1 OBJETIVO GERAL	12
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	13
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2 REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1 PROTOCOLO DE PESQUISA	16
2.2 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO	17
2.3 SEQUENCIAMENTO E PROGRAMAÇÃO DE CAMINHÕES	18
2.4 <i>OPEN SHOP</i>	24
2.5 <i>SIMULATED ANNEALING</i>	30
3 METODOLOGIA	33
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	33
3.2 ETAPAS METODOLÓGICAS	34
3.2.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	35
3.2.2 CONCEPÇÃO	36
3.2.3 IMPLEMENTAÇÃO	37
3.2.4 ANÁLISE	38
4 MODELAGEM MATEMÁTICA	39
4.1 ÍNDICES E PARÂMETROS	39
4.2 VARIÁVEIS	40
4.3 MODELAGEM MATEMÁTICA	40

5 ALGORITMO <i>SIMULATED ANNEALING</i> PROPOSTO	44
5.1 SOLUÇÃO INICIAL	45
5.2 FUNÇÃO OBJETIVO E CÁLCULO DA ENERGIA	46
5.3 MÉTODOS DE PERTURBAÇÃO	48
5.4 OUTROS CRITÉRIOS	51
6 RESULTADOS.....	53
6.1 MODELO EXATO	53
6.2 COMPARAÇÃO ENTRE RESOLUÇÃO ÓTIMA E SUBÓTIMA	59
7 CONCLUSÃO	66
REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

A importância do Planejamento e Controle da Produção (PCP) tem se mostrado cada vez maior em todos os ambientes. O uso eficiente de recursos humanos, materiais e produtivos aliado à redução de custos e aumento na qualidade de atendimento aos clientes têm sido fatores chaves para manter a competitividade das empresas.

Para alcançar tais objetivos, muitas tomadas de decisões estão envolvidas no processo como um todo, por exemplo, qual a escala de funcionários, quando e quanto de cada material comprar, qual a ordem de execução das tarefas, entre outros. Segundo Slack (2006), o sequenciamento e a programação da produção são duas das atividades que estão incluídas no escopo do PCP.

Segundo Arenales et al. (2007), a necessidade do sequenciamento surge quando diversos itens são processados no mesmo equipamento e existe um estado de preparação diferente para cada item. Considerando as restrições envolvidas neste processo de sequenciamento, o tempo de espera pode ter um alto impacto no fluxo de produção, além de aumentar o tempo de processamento pode aumentar os custos de produção. A partir deste cenário destaca-se a importância de uma boa programação da produção.

Ainda de acordo com Arenales et al. (2007), a programação não é aplicada apenas à produção, outros setores também podem se beneficiar desta atividade, como o setor de transportes. Uma das aplicações para este setor, é a programação de veículos. Neste trabalho, será abordado um problema mais específico da programação de veículos, que é a programação de caminhões.

1.1 PROBLEMA

A situação deste problema envolve a chegada de vários caminhões por dia em uma empresa e esses caminhões precisam passar por algumas docas já estabelecidas para descarregar e/ou carregar materiais. A programação de caminhões busca determinar a ordem de processamento dos caminhões em cada doca, bem como o momento em que os caminhões são designados às docas, determinando o tempo de chegada e saída do caminhão em cada doca.

Este problema foi baseado em uma empresa do setor automobilístico que, atualmente realiza esta atividade de forma manual, sem o auxílio de algum *software*, semelhante a muitas outras empresas, sendo ou não do setor automobilístico. Além disso, também não há uma metodologia definida para esta programação; o funcionário responsável por esta tarefa a realiza de acordo com sua experiência.

Baseado no que foi apresentado, o presente estudo tem o intuito de gerar a melhor programação de caminhões a entrarem na fábrica e a sequência de docas a serem percorridas por cada veículo de modo a minimizar o tempo de permanência dos motoristas dentro da empresa.

1.2 JUSTIFICATIVA

Dentre os resultados esperados para o problema de sequenciamento ou programação de caminhões, destaca-se a redução do tempo de espera dos motoristas que realizam as entregas. A espera é classificada como um dos sete desperdícios da produção. Muitas vezes é um problema oculto, mas que influencia diretamente no fluxo de produção e até mesmo no custo do produto final.

Wirth e Emde (2018) apresentam em seu trabalho uma pesquisa direcionada pelo governo alemão, com opiniões de mais de 1000 fornecedores logísticos. A pesquisa de 2016 aponta que entre 5% e 13% dos entrevistados esperam mais de 2 horas entre o tempo de registro nos portões da empresa e o início da descarga dos produtos; e que mais da metade dos entrevistados afirmam esperar pelo menos 60 minutos nos pátios das indústrias.

A espera representa um tempo que poderia estar sendo direcionado para uma atividade que agregasse valor ao processo, tanto do ponto de vista da empresa que está recebendo o produto quanto da que está realizando a entrega. Ao gerenciar a redução do tempo de espera, influencia-se também a execução de outras tarefas, que podem estar diretamente ou indiretamente relacionadas ao carregamento ou descarregamento dos produtos.

Este cenário não se restringe apenas ao setor automobilístico. É comum em muitas empresas que lidam de alguma forma com o setor logístico, com o recebimento de veículos em seu complexo. Muitas empresas devem seguir os mesmos passos da empresa citada como exemplo neste trabalho, e executar todo esse gerenciamento e programação de veículos de forma empírica e manual. Com estas considerações, a

possibilidade de resolução de um problema de programação de veículos em docas por meio de modelos matemáticos programados em *softwares* possibilitará a automatização de atividades que até então eram realizadas de forma manual, otimizando o tempo dos funcionários que realizam estas operações.

A princípio pode parecer um problema que afetaria somente o fornecedor que está entregando o produto, mas esta espera pode estar sendo refletida em custos mais altos para a empresa. O gerenciamento de caminhões e plataformas pode trazer economia de custos para a indústria, pois uma vez que o motorista tem que esperar muito tempo dentro de uma empresa para realizar o carregamento ou descarregamento de produtos, o fornecedor pode optar por aumentar o custo do seu produto para compensar o tempo perdido com esta atividade que não agrega valor ao seu processo.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho foi baseado nas atividades de programação de caminhões realizadas por uma empresa automobilística situada na região metropolitana de Curitiba, mais especificamente no setor de transporte e logística de todo o complexo industrial da fábrica. Entretanto, o objetivo deste estudo não é resolver o problema existente nesta empresa, e sim, basear-se nele para adaptar e propor um modelo matemático capaz de resolver problemas parecidos enfrentados por diversas outras empresas. O desenvolvimento do modelo matemático terá também o objetivo de adaptação para companhias atuantes em outras áreas, que não o setor automobilístico, mas que necessitam de programação de caminhões para alguma atividade.

1.3.1 OBJETIVO GERAL

Propor um modelo matemático para a programação e sequenciamento de veículos de modo a minimizar o tempo dos motoristas dentro da empresa e resolvê-lo de maneira exata e aproximada (subótima).

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram seguidos:

- Levantamento das formulações matemáticas aplicadas na resolução de problemas de programação de caminhões;
- Adaptar o estudo de caso para um problema de sequenciamento e programação;
- Adaptar o problema a um modelo matemático;
- Testar numericamente a integridade do modelo proposto com um problema pequeno;
- Testar a integridade do modelo em um problema de maiores dimensões;
- Levantamento das heurísticas e metaheurísticas mais utilizadas na literatura para resolução de problemas de programação de caminhões;
- Resolução do modelo proposto pela heurística escolhida e verificação de desempenho.

1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho visa definir a programação dos caminhões que entram na fábrica, detalhando os horários de entrada e saída em cada doca, inclusive na recepção, ponto que todos os caminhões devem percorrer antes de iniciar o percurso dentro do complexo industrial. Considerando a intenção de tornar este trabalho aplicável a empresas de diversos setores que lidam com controle de fluxo de veículos, a passagem do caminhão pela recepção é um ponto comum, uma vez que há a necessidade de controlar e registrar todas as pessoas e veículos que entram na empresa. Embora algumas empresas possam ter mais de uma recepção ou mais de um operador em paralelo, possibilitando o atendimento de mais de um veículo simultaneamente, o modelo matemático proposto neste trabalho considera apenas uma recepção, com apenas um veículo em atendimento por vez.

O modelo proposto também não considera restrições de capacidade de armazenamento para as docas, pois assume-se que a empresa requisitará a vinda do fornecedor até a empresa uma vez que há a necessidade dos materiais, e

consequentemente que há espaço disponível na doca, ou até mesmo em outros espaços do complexo industrial, para armazenar as mercadorias recebidas.

Em cenários reais, pode ocorrer de os caminhões finalizarem as operações em uma doca e terem que esperar a disponibilidade da doca seguinte. Nestes casos, o caminhão permanecerá parado no pátio da empresa, ou em algum outro espaço físico dentro do complexo industrial. Restrições de capacidade relacionadas a estes espaços de espera não são abordados no problema, pois considera-se que a empresa tenha espaço físico suficiente, onde os caminhões poderão permanecer durante seu percurso dentro da empresa. Filas de espera de caminhões para passarem pela recepção e entrarem no complexo industrial também não são consideradas, já que o modelo proposto determinará o tempo de chegada dos caminhões ao complexo industrial, evitando a espera.

Como em diversos outros problemas, uma solução ótima pode não ser totalmente seguida e implementada devido a imprevistos e incertezas existentes nos processos reais. Considerando o problema de programação de caminhões, pode-se ter o cenário de que um fornecedor não conseguirá chegar na empresa no dia ou horário proposto pela empresa, devido a problemas mecânicos do veículo, problemas de tráfego ou até mesmo, condições climáticas. Diante de um cenário como este, é bastante comum as empresas precisarem readaptar seus roteiros, o que torna o problema dinâmico. Entretanto, o modelo matemático proposto para programação de caminhões neste trabalho não considerará este cenário dinâmico e será assumido que todos os caminhões estarão disponíveis nos momentos definidos pela empresa.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 são apresentadas as principais características dos problemas de sequenciamento e programação de caminhões dentro do contexto de Programação e Controle da Produção, bem como as formulações matemáticas e algoritmos aplicados para resolução de problemas similares. Ainda no capítulo 2, são apresentadas duas ferramentas de resolução: *Open Shop*, com a descrição das variáveis e restrições apresentadas nas formulações matemáticas de diferentes autores; e *Simulated Annealing*, com uma breve apresentação da metaheurística.

O capítulo 3 detalha o problema abordado neste trabalho e apresenta a metodologia para a obtenção e análise das soluções ótimas e subótimas. O capítulo

4 apresenta o modelo matemático desenvolvido baseado no problema *Open Shop*; enquanto o capítulo 5 apresenta a explicação das etapas do algoritmo *Simulated Annealing* proposto.

O capítulo 6 apresenta os resultados ótimos e subótimos obtidos com a resolução exata do modelo matemático e a resolução do algoritmo proposto. Por fim, o capítulo 7 encerra o trabalho com as conclusões.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, será apresentado um breve referencial teórico sobre o problema de pesquisa. Inicialmente serão apresentados conceitos fundamentais de Engenharia de Produção e Pesquisa Operacional, a fim de buscar embasamento teórico para solucionar o problema de pesquisa.

Como a finalidade desta pesquisa é o desenvolvimento de um modelo matemático representando as restrições reais e o objetivo da empresa, a revisão da literatura visou responder as questões de como situações reais são transformadas em restrições matemáticas e também quais algoritmos são mais utilizados para resolução deste tipo de problema, e dentre estes, quais fornecem os melhores resultados.

2.1 PROTOCOLO DE PESQUISA

Os termos de busca foram definidos de forma com que os resultados obtidos fossem convenientes ao objetivo do estudo. A pesquisa foi realizada nas bases de dados *Science Direct* e *Web of Science*. Os termos de busca utilizados foram “*Truck Scheduling*”, “*Arrivals*” e “*Time window*” com operador lógico “*and*”. Quanto ao tipo de publicação, optou-se por considerar apenas artigos de pesquisa publicados entre os anos 2015 e 2019 de forma a obter as abordagens mais recentes sobre o assunto.

Como resultado da aplicação destes filtros mais a consideração de artigos de livre acesso, inicialmente, obteve-se 89 artigos na *Science Direct* e 9 na *Web of Science*. Os critérios de exclusão foram: não ter relação com o tema e duplicidade de artigos entre as bases. Na primeira etapa, foi realizado um filtro entre os artigos, removendo os duplicados. O segundo passo envolveu uma análise dos títulos, e aqueles documentos que não apresentavam relação com o tema foram eliminados da amostra, resultando em 45 artigos. Por fim, seguiu-se uma análise mais detalhada com a leitura dos resumos, reduzindo a amostra final para 20 artigos. Estes artigos foram utilizados para identificar os principais conceitos relacionados ao problema de sequenciamento de caminhões, bem como os métodos aplicados para resoluções ótimas e subótimas.

Durante a revisão também foi aplicado o procedimento *backward*, que consiste em consultar referências dos estudos já selecionados (DRESCH et al., 2015, p.151). Este processo adicionou mais dois artigos na revisão sistemática, sendo eles os

trabalhos de Liao et al. (2013) e Berghman et al. (2014). Além disso, outras referências foram consultadas durante o desenvolvimento do trabalho, como Arenales et al. (2007), Slack et al. (2006) e Tubino (2009) para contextualizar o problema dentro do Planejamento e Controle da Produção; e Naderi e Zandieh (2014) e Pinedo (2016) para descrever os conceitos de *open shop*.

2.2 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO

O Planejamento e Controle da Produção (PCP) é classificado como um setor de apoio que analisa informações vindas de diversas áreas e a partir disso gerencia os recursos produtivos e suas operações. Os planos tomados em relação ao sistema de produção podem ser divididos em um horizonte de planejamento de três níveis: longo, médio e curto prazo (TUBINO, 2009).

O PCP executa tarefas em todos os níveis de planejamento. O primeiro nível é o Planejamento Estratégico, responsável por elaborar um Plano de Produção de longo prazo. Por ser de longo prazo, este plano geralmente é pouco detalhado. Arenales et al. (2007) complementam que as decisões deste nível envolvem altos investimentos.

Em seguida, tem-se o Planejamento Mestre da Produção. Com o plano de produção já definido, esta etapa tem o objetivo de definir um planejamento mais detalhado, em um período de tempo menor. Na próxima etapa, a Programação da Produção estabelece quando e quanto de cada produto deve ser produzido, incluindo o sequenciamento das atividades. Por fim, o acompanhamento e controle da produção coleta diversos dados para auxiliar futuras tomadas de decisões (TUBINO, 2009).

De acordo com Slack et al. (2006), o Planejamento e Controle da Produção busca conciliar fornecimento e demanda nos quesitos volume, tempo e qualidade. Esta conciliação envolve três atividades:

- Carregamento: refere-se ao volume permitido para uma operação produtiva. Nesta etapa, considera-se o tempo de disponibilidade dos equipamentos, bem como tarefas que podem diminuir este tempo, como tempo de troca de ferramentas e *setup* em geral, limpeza e até mesmo análises de confiabilidade.
- Sequência: estabelece prioridade das tarefas a serem executadas. Esta priorização geralmente baseia-se em regras previamente definidas, como prioridade ao consumidor ou data prometida de entrega.

- Programação: especifica o tempo de início e fim para cada tarefa. Esta atividade é uma das mais complexas no PCP. Isto porque o número de possíveis programações cresce rapidamente em função do número de atividades e processos.

As principais medidas de desempenho relacionadas à programação da produção são: *makespan*, tempo de fluxo total, atraso máximo, atraso total, *lateness* e número de tarefas atrasadas. *Makespan* representa o instante de término de processamento de todas as tarefas; enquanto o tempo de fluxo total é a soma destes instantes. As demais medidas de desempenho são associadas à data de entrega das tarefas e podem ser conflitantes entre si em muitos casos. Por exemplo, uma tarefa atrasada será penalizada, mas uma tarefa adiantada poderá gerar um custo de estoque. Por isso, quando consideradas em um problema, geralmente opta-se por uma otimização com múltiplos objetivos (ARENALES et al., 2007).

Arenales et al. (2007) ilustram em seu livro que o problema de programação não se restringe apenas à produção, considerando apenas tarefas e máquinas. Muitos problemas de programação podem ser aplicados no setor de transportes, sendo a programação de veículos uma das mais importantes.

2.3 SEQUENCIAMENTO E PROGRAMAÇÃO DE CAMINHÕES

O gerenciamento de caminhões e plataformas pode ser uma atividade muito complexa, pois de acordo com Ladier e Alpan (2016a), os gestores buscam atender requerimentos de fornecedores quanto aos horários de chegada e saída da indústria, a fim de melhorar o relacionamento com todos os *stakeholders* envolvidos.

A maior parte dos estudos sobre sequenciamento de caminhões são voltados para plataformas de trailers, contêineres e *cross-docking*. De acordo com Ahkamiraad e Wang (2018), *cross-docking* é uma técnica de gerenciamento de armazéns que consolida mercadorias de descarregamento, rearranjando-as para saída. Dondo e Cerdá (2015) complementam que a estratégia logística consiste em descarregar caminhões de entrada de fornecedores em um terminal de docas com um espaço mínimo para estoque e transferir a carga diretamente para caminhões de saída, que entregarão mercadorias para outros fornecedores ou clientes. O estoque é reduzido a um nível mínimo, pois as mercadorias não passam mais que 24 horas dentro da plataforma de *cross-dock* (LADIER E ALPAN, 2016b).

Ladier e Alpan (2016b) apresentam um estado da arte sobre operações em *cross-docking* com importantes definições relacionadas a docas e sequenciamento de caminhões. Os autores agrupam algumas decisões relacionadas às docas em três níveis. O primeiro é o nível estratégico e está mais relacionado às características físicas das docas, como forma e número de docas.

O nível tático engloba três principais decisões:

- Capacidades internas de armazenamento das docas;
- Preempção: refere-se à possibilidade de interrupção de operações de carga e descarga. Se a preempção é permitida, o caminhão interrompe sua operação, retorna ao pátio para que outro caminhão assuma sua posição na doca. E em outro momento, o caminhão retorna à doca para completar sua operação de carga ou descarga;
- Modo de serviço: uma doca pode ser exclusiva se cada entrada é dedicada apenas à uma operação (carga ou descarga), combinada se algumas entradas são específicas para carga e outras para descarga, ou mista se uma entrada pode realizar qualquer uma das operações. A maior parte dos estudos publicados foca no modo de serviço exclusivo.

O terceiro e último nível é o operacional. Algumas características desse nível geralmente são impostas pelos *stakeholders*, neste caso os fornecedores. Estas imposições geralmente são de difícil negociação, o que diminui o controle dos gerentes sobre as decisões. Um exemplo de característica operacional é o tempo de chegada dos caminhões. Os caminhões podem estar disponíveis no início do horizonte de planejamento, também conhecido como tempo zero, ou o tempo de chegada pode ser definido por cada fornecedor.

Ladier e Alpan (2016b) também apresentam algumas medidas de desempenho, geralmente associadas às funções objetivo dos problemas. As mais comuns são tempo total de carga e descarga; desvio do tempo de processamento do caminhão, nos casos em que o caminhão precisa chegar muito tempo antes ou depois do horário desejado; nível de congestionamento nas docas; horas trabalhadas e *makespan*.

Ainda de acordo com Ladier e Alpan (2016b), o gerenciamento de caminhões e plataformas pode subdividir-se em três diferentes problemas:

- Designação de caminhão à entrada da doca: neste problema, o número de caminhões geralmente é menor que o número de docas. Portanto,

busca-se definir qual caminhão será designado à qual doca, considerando-se apenas dimensão espacial;

- Sequenciamento de caminhões: neste caso, o número de caminhões é maior que o número de docas e objetiva-se determinar a ordem de processamento dos caminhões em cada doca;
- Programação de caminhões: é a incorporação da dimensão temporal ao problema de sequenciamento. Além da ordem, define-se também a qual momento os caminhões são designados às docas, determinando o tempo de chegada e saída do caminhão em cada doca.

Embora este trabalho não seja uma aplicação de *cross-docking*, problemas deste tipo podem ser usados como referência, pois segundo Ladier e Alpan (2016b), grande parte dos autores consideram como decisões apenas um lado do problema. Em outras palavras, os autores geralmente focam apenas na chegada dos caminhões, que envolve a etapa o descarregamento. A passagem das cargas pelo *cross-docking* e o carregamento dos caminhões para outras entregas geralmente não são consideradas simultaneamente no problema.

O problema apresentado por Liao et al. (2013) de minimizar o *tardiness*, ou seja, minimizar o atraso dos caminhões ao deixar as docas, assume tempos de partida pré-fixados. Os autores resolveram o modelo proposto com 6 metaheurísticas diferentes: *simulated annealing*, busca tabu, otimização em colônia de formigas, evolução diferencial e duas versões de evolução diferencial híbrida. Os métodos que apresentaram melhores resultados foram as evoluções diferenciais híbridas e otimização em colônia de formigas, sendo que este último apresentou melhor performance computacional.

Molavi, Shahmardan e Sajadieh (2018) também assumem tempos de partida previamente fixados e seu problema tem como objetivo minimizar custos relacionados ao atraso no tempo de saída das docas. Os métodos aplicados pelos autores foram metaheurísticas híbridas combinando algoritmo genético e busca local com variável reduzida.

Assadi e Bagheri (2016) também buscam minimizar o *tardiness*, mas o que diferencia seu estudo dos citados anteriormente, é que os prazos de partida são considerados como restrições suaves. Isso significa que o cumprimento dos prazos é desejável, mas não obrigatório. Entretanto, o não cumprimento do prazo de partida é considerado como uma penalidade na função objetivo. Os autores resolveram

problemas menores com CPLEX e para os maiores adotaram dois métodos, evolução diferencial e *simulated annealing* baseado na população. O desempenho dos métodos foi avaliado aplicando-os também aos problemas menores e comparando com os resultados ótimos obtidos pelo CPLEX.

Por se tratar de um problema *NP-hard*, as formulações matemáticas geralmente tendem a ser mais simplificadas, abordando cenários menos complexos com a finalidade de facilitar a resolução. Como exemplo, Ladier e Alpin (2016b) citam que grande parte dos estudos focam em problemas com modo de serviço exclusivo, pois entradas de docas exclusivas para carga ou descarga facilitam a resolução do problema quando comparado a serviços mistos ou combinados, proporcionando resultados com menores tempos computacionais.

Entretanto, com o passar do tempo, os estudos publicados foram se aprimorando cada vez mais na tentativa de representar com mais veracidade as reais situações enfrentadas pelas indústrias. Os problemas passaram a incluir mais restrições operacionais, como janelas de tempo e docas com modo de serviço combinado.

Gelareh et al. (2016) consideram restrições operacionais de tempo em seu problema e adotam desigualdades válidas e *branch and cut* para resolver o modelo de programação inteira proposto.

Como existem muitas incertezas relacionadas à programação dos caminhões, Ladier e Alpan (2016a) desenvolveram modelos de otimização robusta com janelas de tempo para manter a viabilidade das soluções diante de imprevistos. Os autores aplicaram técnicas de otimização robusta e métodos de sequenciamento de projetos robustos, como redundância de recursos, o que apresentou bons resultados. Rajabi e Shirazi (2016) também abordam incertezas relacionadas ao tempo de chegada dos caminhões e adotam *simulated annealing* e busca em vizinhanças variáveis como método de resolução.

Janelas de tempo também são adicionadas ao problema proposto por Bodnar et al. (2015), mas os autores o aprofundam um pouco mais ao considerar modo de serviço combinado para as docas. O método utilizado para resolução foi um algoritmo de busca na vizinhança.

Recentemente, mais autores passaram a considerar docas operantes em modo de serviço combinado como Rijal, Bijvank e Koster (2019) que também analisaram

como esse modo de serviço e a posição das docas afetam os custos associados à programação dos caminhões no método de busca em vizinhança.

O artigo publicado por Shahmardan e Sajadieh (2019) evidencia que a adoção de docas combinadas pode aumentar a taxa de utilização e flexibilidade das docas em até 18%. Mohtashami (2015) complementa esta ideia ao afirmar que caminhões compostos com descarregamento parcial proporcionam maior flexibilidade.

O modelo proposto por Shahmardan e Sajadieh (2019) considera caminhões compostos, que carregam e descarregam, além de permitir descarregamento parcial. A resolução do problema por meio do algoritmo *simulated annealing* aplicado em conjunto com busca em vizinhança, melhorou a função objetivo ao minimizar o *makespan* em até 56%.

Bazgosha et al. (2017) apresentam um problema de programação de operações de carregamento e descarregamento com a inclusão de restrições de inventário ao considerar espaço de armazenamento limitado para as docas. Os autores formularam um modelo de programação linear inteira e utilizaram algumas heurísticas e metaheurísticas para resolução do problema, sendo algoritmo genético uma das técnicas aplicadas.

Alguns autores também associam o problema de programação de caminhões a outros problemas da indústria. A capacidade de responder prontamente às situações tem sido um dos desafios para empresas em geral. Com esta consideração Dulebenets (2019) aborda um problema de programação de caminhões *just in time*, propondo um algoritmo evolucionário paralelo para a resolução do modelo. Segundo o autor, o algoritmo proposto apresentou soluções melhores que outros algoritmos mais conhecidos, como busca tabu.

Fard e Vahdani (2019) também aprofundam um pouco mais o estudo agregando janelas de tempo, consumo de energia e gerenciamento de filas ao problema. De acordo com os autores, a fila nas docas pode estar relacionada ao uso de equipamentos de movimentação interna das docas. Com base nesta consideração propõem um modelo de programação com função bi-objetivo, acompanhado de um sistema de filas, com os objetivos de minimizar o tempo de espera dos caminhões e minimizar o consumo de energia relacionado aos equipamentos de transporte interno das docas.

Tadumadze et al. (2019) consideram uma abordagem relacionada à força de trabalho ao problema, como o número de trabalhadores designados para auxiliar nas

operações de carga e descarga. A maioria dos trabalhos nem menciona o número de trabalhadores designados a cada operação, e quando há menção, assume-se um número fixo para todas as operações. Os autores mostraram, por meio de modelos de programação inteira mista reformulados para problemas intervalados, que o tempo de processamento dos caminhões pode ser melhorado com um planejamento integrado.

Não se encontram muitos artigos na literatura abordando a aplicação do problema de programação de caminhões em indústrias, com dados reais. Nesta pesquisa, três artigos destacaram-se neste quesito.

Peng e Zhou (2019) abordam um problema aplicado à indústria automotiva, onde lotes de contêineres são movimentados de uma plataforma de *cross-docking* até uma montadora. O problema apresentado consiste em determinar a programação de quais lotes de contêineres são designados aos caminhões, o sequenciamento e o intervalo de tempo com o objetivo de minimizar o *makespan* e os custos associados a *tardiness*. Os autores aplicam um algoritmo pouco utilizado na literatura, conhecido por otimização *gray Wolf*. *Gray Wolf* é um algoritmo utilizado para resolução de problemas de otimização complexos e é baseado na caça de lobos. Neste algoritmo, as funções objetivos são divididas em 3 categorias: ótima, segunda melhor e terceira melhor, as demais soluções são classificadas como. A metaheurística inicia com uma população aleatória e o processo de busca é baseado na hierarquia dos lobos (soluções).

Berghman et al. (2014) apresentam uma situação em um armazém da Toyota na Bélgica. O problema envolve trailers que chegam a um armazém e precisam descarregar seus produtos e também trailers que precisam carregar produtos antes de deixarem o armazém. O objetivo é minimizar o tempo de entrega dos operadores logísticos destes trailers. O problema foi modelado como um *flow shop* de 3 estágios flexíveis. O primeiro estágio considera o transporte do trailer até o terminal de carga ou descarga; o segundo refere-se à própria operação de carga e descarga. O terceiro estágio consiste no transporte de volta ao estacionamento. Os autores consideraram um tempo de deslocamento fixo, independente da distância e propuseram três diferentes formulações inteiras para serem aplicadas ao problema da Toyota, sendo as formulações baseadas na designação, no fluxo e na indexação de tempo. A formulação que apresentou melhores resultados foi a baseada na indexação de tempo.

Cota et al. (2016) apresentam um problema de sequenciamento de dois estágios, para caminhões que chegam e caminhões que saem, com o objetivo de minimizar o *makespan*. Os autores modelaram o problema como um *flow shop* híbrido de dois estágios com a apresentação de uma formulação linear inteira mista com indexação de tempo e testaram uma heurística polinomial construtiva para resolução de instâncias médias e grandes.

Wirth e Emde (2018) abordam um problema de programação no qual caminhões precisam visitar algumas docas específicas para entregar peças e cada caminhão tem um tempo individual de chegada e previsão de saída da fábrica. O objetivo é minimizar a penalidade para aqueles caminhões que não respeitam o tempo de saída da fábrica. Os autores propuseram um modelo de programação linear mista baseado no problema *open shop* para resolução de problemas pequenos e utilizaram a metaheurística conhecida por procedimento de busca adaptativa aleatória ou GRASP (*greedy randomized adaptive search procedure*).

Os estudos de Serrano et al. (2017) retratam um caso de programações de caminhões da montadora Renault. Neste problema, a programação e sequenciamento dos caminhões era realizada de maneira totalmente empírica, com base nas escolhas do funcionário responsável pela atividade e nas disponibilidades momentâneas das docas. Além do mais, haviam fornecedores que pré-agendavam o tempo de chegada dos caminhões. Desenhada a situação-problema, o objetivo do modelo desenvolvido é desenvolver planejamentos semanais de modo a minimizar os custos associados às penalidades de não atender o tempo de chegada pré-estabelecido pelos fornecedores. Os autores propõem a utilização do CPLEX para resolver o problema.

2.4 OPEN SHOP

Na literatura já existem alguns problemas clássicos de sequenciamento e programação conhecidos baseados nas características de número de tarefas, número de máquinas e rota de processamento de tarefas. Dois desses problemas clássicos são o *flow shop* e o *job shop*.

Um problema é considerado como um *flow shop* se as tarefas seguem a mesma rota de processamento em todas as máquinas. Se cada tarefa possui uma rota de processamento própria e esta rota é especificada com o problema, então trata-se de um *job shop* (NADERI E ZANDIEH, 2014).

Existe um terceiro problema de sequenciamento, menos conhecido que os dois citados anteriormente, chamado de *open shop*. Segundo Naderi e Zandieh (2014), este problema é aplicado para casos em que as rotas de processamento não são previamente determinadas.

Considerando n tarefas e m máquinas, cada tarefa tem que ser processada em cada uma das m máquinas. De acordo com Pinedo (2016), as principais diferenças do *open shop* são:

- O tempo de processamento em algumas máquinas pode ser zero;
- As rotas de processamento das tarefas são abertas. Isso significa que além da decisão sobre as sequências de tarefas em cada máquina, o problema também tem o objetivo de decidir a rota de processamento das tarefas.

Naderi e Zandieh (2014) apresentaram em seu trabalho três modelos diferentes de programação linear mista para o problema *open shop*. Dois deles são baseados na sequência das tarefas e máquinas e utilizam variáveis binárias para representar essas sequências. Considerando o contexto deste trabalho, a nomenclatura de tarefas será substituída por caminhões e a de máquinas, por docas.

No modelo 1 os autores introduzem um caminhão fictício 0, que precede o primeiro caminhão em todas as docas, bem como uma doca fictícia 0, que precede a primeira doca para todos os caminhões. Naderi e Zandieh (2014) estabeleceram as seguintes notações para o modelo 1:

Parâmetros:

n : número de caminhões ;

m : número de docas ;

$O_{j,i}$: identificação da operação do caminhão j na doca i ;

$P_{j,i}$: tempo de processamento de $O_{j,i}$;

M : número positivo ;

Índices

k : índice dos caminhões $\{0, 1, 2, \dots, n\}$;

j : índice dos caminhões $\{1, 2, \dots, n\}$;

l : índice das docas $\{0, 1, 2, \dots, m\}$;

i : índice das docas $\{1, 2, \dots, m\}$;

Variáveis

$C_{j,i}$: tempo de término de $O_{j,i}$;

S_j : tempo de início do caminhão j ;

$$X_{j,i,l} = \begin{cases} 1, & \text{se } O_{j,i} \text{ é processada após } O_{j,l} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$Y_{j,i,k} = \begin{cases} 1, & \text{se } O_{j,i} \text{ é processada após } O_{k,i} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$\text{Min } C_{max} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k=0, k \neq j}^n Y_{j,i,k} = 1 = \sum_{l=0, l \neq i}^m X_{j,i,l} = 1 \quad \forall j, i \quad (2)$$

$$\sum_{j=1, j \neq k}^n Y_{j,i,k} \leq 1 \quad \forall i, k \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1, i \neq l}^m X_{j,i,l} \leq 1 \quad \forall j, l \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n Y_{j,i,0} = 1 \quad \forall i \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^m X_{j,i,0} = 1 \quad \forall j \quad (6)$$

$$Y_{j,i,k} + Y_{k,i,j} \leq 1 \quad \forall i, j, k \neq j \quad (7)$$

$$X_{j,i,l} + X_{j,l,i} \leq 1 \quad \forall j, i, l \neq i \quad (8)$$

$$C_{j,i} \geq S_j + \sum_{l=1}^m P_{j,i} \quad \forall j, i \quad (9)$$

$$C_{j,i} \geq S_j + P_{j,i} \quad \forall j, i \quad (10)$$

$$C_{j,i} \geq C_{j,l} + P_{j,i} - M * (1 - X_{j,i,l}) \quad \forall j, i, l \neq i \quad (11)$$

$$C_{j,i} \geq C_{k,i} + P_{j,i} - M * (1 - Y_{j,i,k}) \quad \forall i, j, k \neq j \quad (12)$$

$$C_{max} \geq C_{j,i} \quad \forall j, i \quad (13)$$

$$X_{j,i,l} \in \{0,1\} \quad \forall j, i, l \neq i \quad (14)$$

$$Y_{j,i,k} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k \neq j \quad (15)$$

$$C_{j,0} = C_{0,i} = 0 \quad \forall j, i \quad (16)$$

A função objetivo (1) apresentada pelos autores busca a minimização do *makespan*. As restrições (2) indicam que cada operação é designada apenas uma vez. As restrições (3) e (4) garantem que cada operação terá apenas uma sucessora nas sequências dos caminhões e das docas. As restrições (5) e (6) asseguram que o caminhão 0 e a doca 0, ambos fictícios, terão exatamente um sucessor.

As restrições (7) e (8) declaram que uma operação não pode ser sucessora e predecessora de outra operação ao mesmo tempo. As restrições (9) e (10) buscam garantir a característica de não espera, ou seja, de que as operações de um caminhão serão executadas sem interrupções entre as docas. As restrições (11) asseguram que o caminhão só irá para a próxima doca depois de finalizar a atividade na doca anterior. Enquanto as restrições (12) garantem que uma doca receberá o próximo caminhão apenas após a finalização as operações no caminhão anterior. As restrições (13) calculam o *makespan*. As restrições (14) e (15) definem os tipos das variáveis. As restrições (16) explicitam que os tempos de término para o caminhão e doca fictícios serão sempre zero.

O modelo 2 apresentado por Naderi e Zandieh (2014) segue os mesmos parâmetros e variáveis do modelo 1. A mudança do modelo 2 é que este não apresenta doca e caminhão fictícios, alterando a definição dos índices e também o modelo:

Índices:

j, k : índices dos caminhões $\{1, 2, \dots, n\}$;

i, l : índices das docas $\{1, 2, \dots, m\}$;

$$\text{Min } C_{max} \quad (17)$$

Sujeito a:

$$C_{j,i} \geq S_j + \sum_{l=1}^m P_{j,i} \quad \forall j, i \quad (18)$$

$$C_{j,i} \geq S_j + P_{j,i} \quad \forall j, i \quad (19)$$

$$C_{j,i} \geq C_{j,l} + d + P_{j,i} - M * (1 - X_{j,i,l}) \quad \forall j, i, l \neq i \quad (20)$$

$$C_{j,l} \geq C_{j,i} + d + P_{j,l} - M * X_{j,i,l} \quad \forall j, i, l \neq i \quad (21)$$

$$C_{j,i} \geq C_{k,i} + d + P_{j,i} - M * (1 - Y_{j,i,k}) \quad \forall i, j, k \neq j \quad (22)$$

$$C_{k,i} \geq C_{j,i} + d + P_{k,i} - M * Y_{j,i,k} \quad \forall i, j, k \neq j \quad (23)$$

$$C_{max} \geq C_{j,i} \quad \forall j, i \quad (24)$$

$$X_{j,i,l} \in \{0,1\} \quad \forall j, i, l \neq i \quad (25)$$

$$Y_{j,i,k} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k \neq j \quad (26)$$

A função objetivo (17) é a mesma do modelo 1, minimizar o *makespan*. As restrições (18) e (19) têm a mesma finalidade das restrições (7) e (8) do modelo 1, garantir a característica de não espera. As restrições (20) e (21) são restrições dicotômicas e também buscam assegurar que o caminhão só irá para a próxima doca depois de finalizar a atividade na doca anterior. As restrições (22) e (23) são similares às (20) e (21), garantindo que uma doca receberá o próximo caminhão apenas após a finalização as operações no caminhão anterior. As restrições (24) calculam o *makespan*. As restrições (25) e (26) definem os tipos das variáveis.

Wirth e Edem (2018) também estruturam seu modelo de programação linear mista baseado em um problema *open shop*. Os autores utilizaram as seguintes notações:

J : conjunto de caminhões (índices j, k);

M : conjunto de doca (índices i, i');

M_j : conjunto de docas a serem visitadas pelo caminhão j ;

\mathcal{M} : inteiro de grande valor;

$t_{ii'}$: tempo de deslocamento da doca i até a doca i' ;

p_{ij} : tempo de processamento do caminhão j na doca i ;

r_j : tempo de chegada do caminhão j ;

d_j : prazo do caminhão j ;

w_j : taxa de demurrage por unidade de tempo de atraso do caminhão j ;

τ_{ij} : tempo de início de processamento do caminhão j na doca i ;

C_j : tempo de conclusão do caminhão j ;

$X_{ijk} = \begin{cases} 1, \text{ se o caminhão } j \text{ é predecessor do caminhão } k \text{ na doca } i \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$

$\alpha_{ii'j} = \begin{cases} 1, \text{ se o caminhão } j \text{ visita a doca } i \text{ depois da doca } i' \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$

$$\text{Min} \sum_{j \in J} w_j * (C_j - d_j) \quad (27)$$

Sujeito a:

$$C_j \geq d_j \quad \forall j \in J \quad (28)$$

$$C_j - \tau_{ij} \geq p_{ij} + t_{i0} \quad \forall i \in M_j, j \in J \quad (29)$$

$$\tau_{ij} - \tau_{i'j} + (1 - \alpha_{ii'j}) * \mathcal{M} \geq p_{i'j} + t_{i'i} \quad \forall i, i' \in M_j, j \in J; i \neq i' \quad (30)$$

$$\alpha_{ii'j} + \alpha_{i'ij} = 1 \quad \forall j \in J; i, i' \in M_j; i \neq i' \quad (31)$$

$$\tau_{ik} - \tau_{ij} + (1 - x_{ijk}) * \mathcal{M} \geq p_{ij} \quad \forall j, k \in J; j \neq k, i \in M_j \cap M_k \quad (32)$$

$$x_{ijk} + x_{ikj} = 1 \quad \forall j, k \in J; j \neq k, i \in M_j \cap M_k \quad (33)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall j, k \in J; j \neq k, i \in M_j \cap M_k \quad (34)$$

$$\tau_{ij} \geq r_j + t_{0i} \quad \forall j \in J; i \in M_j \quad (35)$$

$$\alpha_{ii'j} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J; i, i' \in M_j; i \neq i' \quad (36)$$

A função objetivo (27) é de minimizar o custo incorrido pelo atraso dos caminhões. As restrições (28) e (29) indicam que o tempo de conclusão do caminhão

seja próximo do seu prazo e que também será próximo do tempo de processamento da última doca acrescido o tempo de deslocamento até o portão. As restrições (30) buscam reforçar que o caminhão não começará o processamento na doca i sem antes ter terminado a operação na doca i' e ter se deslocado até a doca i . De acordo com as restrições (31), i deve ser predecessora de i' ou vice-versa. As restrições (33) usam a mesma lógica para a ordem dos caminhões que passam pela mesma doca. As restrições (32) buscam garantir que dois caminhões não podem realizar suas operações na mesma doca ao mesmo tempo. As restrições (34), (35) e (36) definem o domínio das variáveis.

2.5 SIMULATED ANNEALING

O *Simulated Annealing* (SA) foi proposto inicialmente por Kirkpatrick et al. (1983) e é baseado no processo físico de resfriamento e recristalização de metais apresentado por Metropolis et al. (1953).

No modelo físico de resfriamento proposto por Metropolis et al. (1953), o sistema é iniciado com uma alta temperatura. As altas temperaturas geram um alto nível de desordem dos átomos, que podem se mover livremente e consequentemente aumentar a energia do sistema. Conforme a temperatura diminui, o sistema atinge estados mais ordenados e de menor energia, até alcançar o estado de equilíbrio, de energia mínima. Na metaheurística, a função objetivo é representada pela energia, as mudanças de estado representam as soluções obtidas a partir da vizinhança do problema inicialmente proposto, e o estado de energia mínima representa a solução ótima (RAMESH ET AL., 2020).

A metaheurística inicia com uma solução aleatória e um valor alto para o parâmetro de temperatura. A cada iteração, uma nova configuração é gerada a partir da vizinhança da solução inicial e a adoção desta configuração como nova solução é baseada em uma decisão probabilística. A cada iteração, o parâmetro de temperatura sofre uma redução no valor.

As variáveis do SA são apresentadas a seguir.

S_i : configuração da iteração i ;

S : melhor configuração;

$f(S)$: valor da função objetivo referente à configuração S ;

$\Delta E = f(S_i) - f(S)$: *variação de energia*;
 T : *temperatura*;
 α : *fator de redução de temperatura*.

O algoritmo inicia com três parâmetros de entrada: configuração inicial (S), temperatura inicial (T) e fator de redução da temperatura (α). Além disso, deve-se definir o critério de parada do algoritmo antes de iniciar as iterações. De acordo com Franzin e Stützle (2019), os principais critérios de parada são:

- Tempo máximo de execução;
- Número máximo de iterações;
- Alcance do valor estipulado como temperatura mínima;
- Algoritmo não encontra nova solução inicial após determinados números de iterações.

. Em seguida, a energia da configuração inicial é calculada ($f(S)$). Os passos a seguir repetem-se até que o algoritmo alcance o critério de parada pré-estipulado:

- Gera-se uma perturbação na vizinhança da solução inicial com a finalidade de encontrar uma nova solução (S_i);
- Calcula-se a energia desta nova solução ($f(S_i)$);
- Calcula-se a variação de energia do sistema: $\Delta E = f(S_i) - f(S)$;
- Se a variação é negativa, a nova configuração substitui a configuração anterior ($S \leftarrow S_i$), significando uma melhora na função objetivo;
- Se a variação é positiva, a aceitação da nova solução baseia-se no fator de Boltzmann-Gibbs: $p(\Delta E) = e^{-\left(\frac{\Delta E}{T}\right)}$;
- Calcula-se o novo valor de T : $T = T * \alpha$

De acordo com Franzin e Stützle (2019), a aceitação de soluções piores é um diferencial do algoritmo *Simulated Annealing*, uma vez que essa característica permite que o algoritmo se mova da área local de exploração para outras vizinhanças com potenciais de melhores soluções, evitando que a busca fique restrita a apenas um local.

As perturbações na vizinhança das configurações dependem da natureza do problema. Liao et al. (2013) adotam o *Simulated Annealing* para resolução do problema de designação de caminhões a docas. Os autores apresentam alguns métodos de alterações nas designações de docas baseados em operadores de mutação uniformes, por meio de geração aleatória de números.

Os principais operadores propostos por Liao et al. (2013) são:

- Operador de troca emparelhado: dois valores são gerados aleatoriamente. Cada valor representa uma posição de doca. A nova solução é obtida por meio da inversão das posições;
- Mutação de inversão: dois valores são gerados aleatoriamente. Neste operador, a inversão ocorre na subsequência encontrada entre estas duas posições;
- Mutação de mudança: escolhe aleatoriamente uma posição e a torna a primeira posição da nova sequência, as posições que se encontravam antes da posição escolhida são movidas para o fim da nova sequência;
- Operador de inserção: geração aleatória de duas posições. O valor da segunda posição escolhida é deslocado para a posição imediatamente anterior ao da primeira posição escolhida.

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem o objetivo de apresentar as etapas realizadas para o desenvolvimento e conclusão do estudo em questão, bem como descrever a metodologia utilizada.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Uma pesquisa pode receber diferentes classificações de acordo com os seguintes critérios: natureza da pesquisa, forma de abordagem, tipo de investigação e instrumentos.

O critério natureza da pesquisa busca categorizá-la de acordo com a finalidade prática. Este estudo se enquadra na definição de pesquisa aplicada, uma vez que tem um fim prático de resolver um problema real; neste caso, propor um modelo matemático para a programação e sequenciamento de veículos de modo a minimizar o tempo gasto pelos motoristas dentro da empresa. Em relação à forma de abordagem, trata-se de uma pesquisa quantitativa por aplicar técnicas de Pesquisa Operacional para resolver o problema citado.

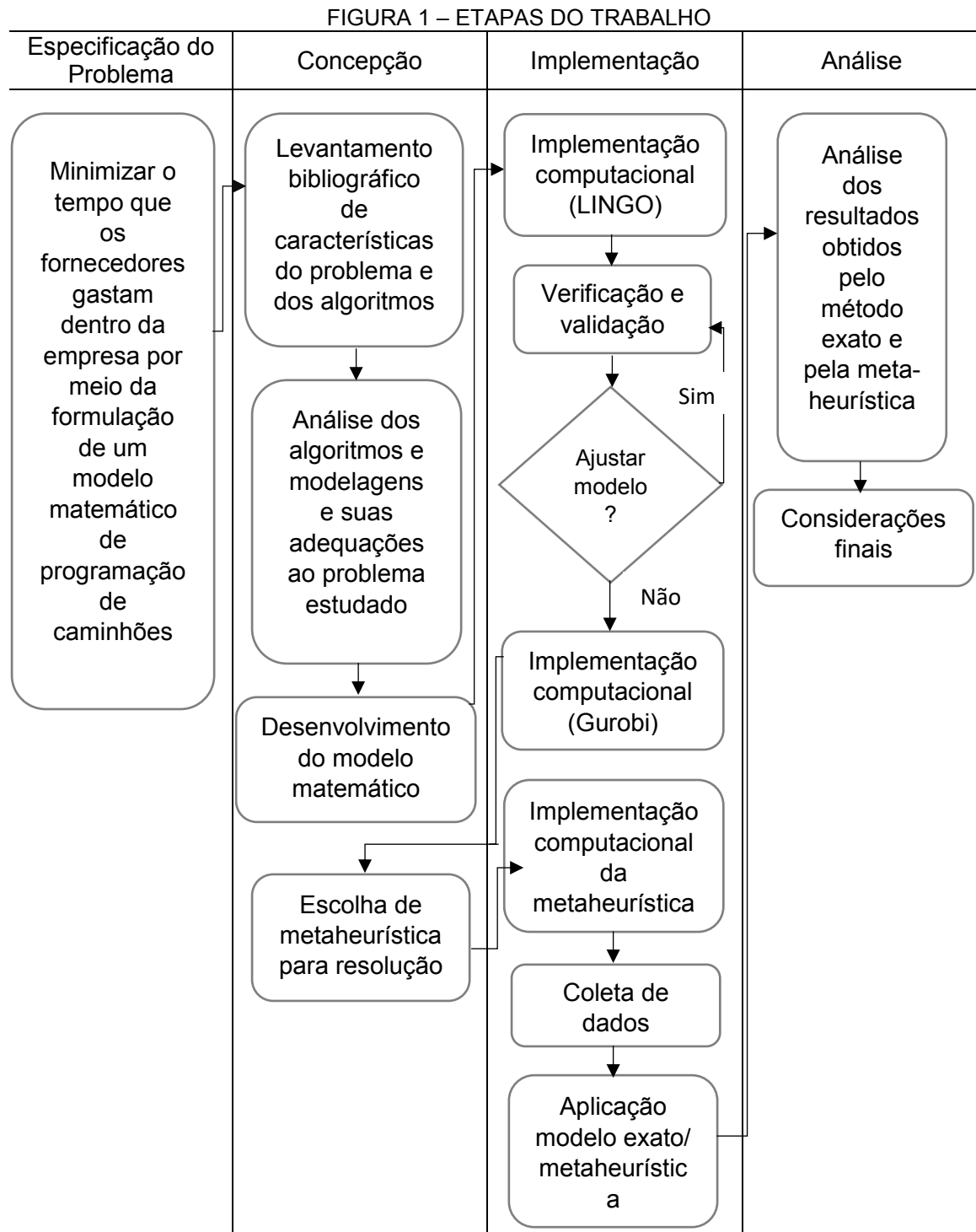
Segundo Gil (2009), pesquisas exploratórias buscam apresentar uma visão geral do problema ao desenvolver e esclarecer conceitos e seu planejamento envolve levantamento bibliográfico e entrevistas não padronizadas. De acordo com este conceito, este estudo também se caracteriza como exploratório, pois para a resolução do problema proposto foi necessário o levantamento de informações como as principais características, formas de modelagem e algoritmos utilizados na resolução do problema.

Por fim, este trabalho enquadra-se como um estudo de caso por investigar e descrever um problema dentro do seu contexto de realidade considerando inclusive variáveis responsáveis por tornar a situação tão complexa.

Considerando a classificação mais aplicada à área de Pesquisa Operacional, este estudo enquadra-se como uma pesquisa empírica prescritiva, uma vez que busca encontrar modelos que se adequem às condições do problema real e que buscam encontrar uma solução para tal.

3.2 ETAPAS METODOLÓGICAS

A FIGURA 1 ilustra de forma geral as etapas realizadas para o desenvolvimento e conclusão do trabalho. As subseções a seguir irão detalhar cada uma das etapas.



FONTE: A autora (2019).

3.2.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema abordado neste trabalho é baseado nas operações de uma empresa do setor automobilístico, mais especificamente no processo de sequenciamento de veículos para carga e descarga no complexo industrial. Diariamente, a empresa modelo recebe diversos caminhões que percorrem algumas docas para descarregar materiais. Alguns caminhões, após descarregar todos os materiais, percorrem algumas docas coletando embalagens que foram disponibilizadas de descarregamentos anteriores. A empresa já sabe quais docas devem ser percorridas por cada caminhão de acordo com o fornecedor e os materiais que serão entregues.

Além disso, as docas operantes desta empresa automobilística possuem diferentes horários de funcionamento. As docas são englobadas em grupos maiores de acordo com o processo produtivo, e cada grupo de docas opera em turnos diferentes, resultando em horários de início e fim de expediente diferentes, bem como intervalos para refeições com diferentes horários.

Este cenário de diferentes horários de funcionamento e intervalos de parada é muito comum em problemas de sequenciamento e programação. Por isso, a modelagem do problema deverá considerar janelas de tempo com a finalidade de propor um modelo matemático abrangente e aplicável a diversas empresas e situações. No caso deste problema, as janelas de tempo indicarão intervalos de tempo, com início e término definidos, nos quais as docas estão inoperantes.

A empresa tomada como base, adota algumas simplificações no processo atual de sequenciamento, sendo uma delas a fixação de valores pré-definidos para os tempos de deslocamento entre docas, tempos de descarga e carga de materiais. Entretanto, quando se analisa a realidade das operações, esses tempos dificilmente serão iguais para todos os caminhões, uma vez que há diversas variáveis que podem influenciar, como tipo do caminhão e características das mercadorias. Como este trabalho tem o objetivo de refletir as reais condições de operações e também de propor um modelo que possa ser facilmente replicado para outras empresas, esta simplificação dos tempos não será adotada neste trabalho.

Dois outros pontos observados nas operações desta companhia automobilística serão replicados no modelo matemático. O primeiro deles é uma condição imposta aos caminhões que também carregam, além de descarregar

materiais. Nestes casos, a empresa impõe uma restrição de que antes de carregar, o caminhão já deve ter descarregado materiais em todas as docas programadas.

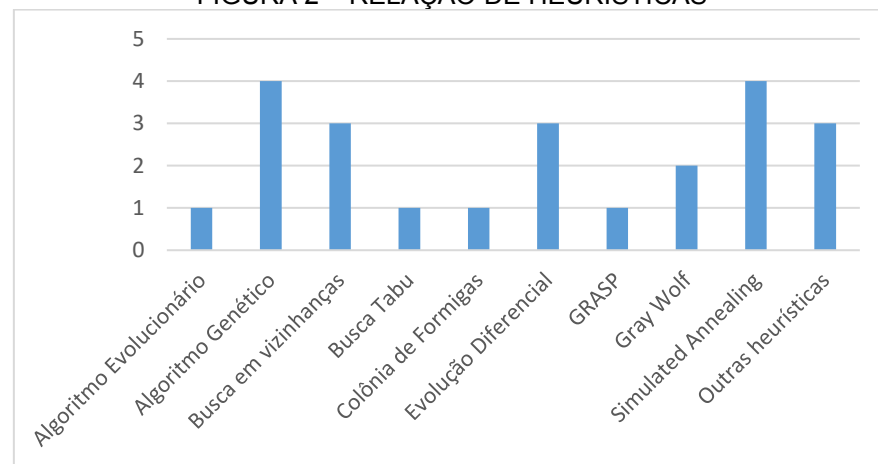
A outra informação a ser considerada no modelo matemático é que antes de iniciar o percurso pelas docas, cada caminhão deve passar pela recepção para realizar algumas atividades administrativas como cadastro dos dados do motorista, do caminhão e das mercadorias, horário da entrada do caminhão na empresa, entre outras informações. Cabe ressaltar que não há filas de espera para atendimento na recepção. O modelo matemático foi desenvolvido de modo a considerar que o caminhão chegue ao complexo industrial e já seja diretamente direcionado ao atendimento na recepção.

3.2.2 CONCEPÇÃO

Após definido o problema de pesquisa, seguiu-se para a fase de concepção onde o problema passou a ser formulado. Com o conhecimento da situação real enfrentada pela empresa, realizou-se um levantamento bibliográfico das características do problema de sequenciamento e programação de caminhões, mas além disso, buscou-se identificar modelagens matemáticas aplicadas em problemas similares e também as heurísticas ou metaheurísticas propostas para resolução. Com os resultados da revisão da literatura, iniciou-se uma análise para identificar as restrições e formulações que poderiam ser replicadas na modelagem do problema tratado neste trabalho, bem como na identificação dos algoritmos mais utilizados para resolução de problemas similares.

A partir da revisão de literatura e análise das modelagens apresentadas pelos autores Wirth e Edem (2018) e Naderi e Zandieh (2014), iniciou-se a formulação do modelo matemático, baseando-se em um problema *open shop*. Nesta etapa, também foram identificadas potenciais heurísticas que poderiam ser aplicadas na resolução do problema. A FIGURA 2 apresenta uma relação das heurísticas e metaheurísticas utilizadas pelos autores citados na revisão da literatura. As metaheurísticas Algoritmo Genético e *Simulated Annealing* foram as mais utilizadas nos trabalhos avaliados na revisão da literatura. Após analisar ambos algoritmos e suas aplicações a problemas similares ao *open shop*, verificou-se que o *Simulated Annealing* possuía uma estrutura mais simples e de fácil implementação, por isso, optou-se por utilizá-lo como ferramenta de resolução para conjuntos de dados de maiores dimensões.

FIGURA 2 – RELAÇÃO DE HEURÍSTICAS



FONTE: A autora (2020).

3.2.3 IMPLEMENTAÇÃO

Tendo o modelo formulado matematicamente, a etapa seguinte foi a implementação computacional do modelo. Inicialmente, utilizou-se o *software* LINGO para programação do modelo.

A escolha do software de LINGO baseou-se pelas características de linguagem de programação simples quando comparada a outros programas, conexão e leitura de dados do Excel e apresentação didática da solução, disponibilizando não somente o valor da função objetivo, mas também os valores de todas as variáveis do problema. Entretanto, a implementação da modelagem no LINGO teve objetivo único de verificar e validar a formulação proposta. Nesta etapa inicial, foram desenvolvidos conjuntos de dados menores, iniciando com 5 caminhões e 5 docas, considerando as restrições impostas, muitas das quais encontradas na empresa que serviu como exemplo. O modelo exato foi executado para estes conjuntos de dados e as soluções obtidas foram analisadas para verificar se as restrições matemáticas atendiam e respeitavam as reais condições que o problema deve considerar. Com base nas análises das soluções, o modelo era ajustado e os testes realizados novamente, até que os resultados se mostrassem consistentes com o esperado.

Para finalizar a validação, o modelo é executado novamente, mas agora com bases de dados maiores para verificar a dimensão do problema que o *software* LINGO é capaz de resolver, uma vez que este apresenta limitações de resoluções. Um exemplo destas limitações é a característica de o programa impor um número máximo de restrições e variáveis. E outro fator limitante é o desempenho computacional;

mesmo não atingindo o máximo de restrições e variáveis, o LINGO pode exigir um tempo alto de execução, enquanto outros *softwares*, como o Gurobi, retornam uma solução ótima com menor tempo de performance.

Com a formulação matemática validada no LINGO, segue-se para a implementação computacional no Gurobi, *software* que apresenta melhor desempenho computacional e que permite a resolução dos problemas com um melhor tempo e possibilidade de resolução de problemas de maiores dimensões.

Considerando que o modelo matemático já estava programado no LINGO, optou-se por não utilizar uma linguagem específica para a programação no Gurobi, e sim gerar um arquivo no formato LP a partir a programação do LINGO.

3.2.4 ANÁLISE

Com o modelo implementado primeiramente no LINGO, o código foi executado para a base de dados menores criadas de modo a simular as reais condições do problema. Os resultados foram traduzidos para um gráfico de Gantt de modo a possibilitar a análise da sequência dos roteiros dos caminhões, janelas de tempos e tempos de terminos das operações nas docas de modo a verificar se as condições impostas ao problema foram realmente respeitadas.

Após a validação do problema com os resultados obtidos pelo LINGO, as mesmas bases de dados foram executadas no *software* Gurobi. E em seguida, foi realizado um comparativo de performance computacional entre os *softwares* de otimização.

Finalizada a análise dos resultados do modelo exato, seguiu-se com a implementação da metaheurística *Simulated Annealing*. Com modelo e metaheurística implementados, os códigos para ambos são executados para bases de dados de diferentes dimensões. Os resultados da metaheurística escolhida são então comparados ao do método exato para verificar sua eficiência. Nesta etapa também são analisados os resultados obtidos pelos métodos propostos e as conclusões acerca do trabalho.

4 MODELAGEM MATEMÁTICA

Este capítulo tem o objetivo de apresentar o problema mediante a modelagem matemática, com o detalhamento das variáveis, parâmetros e restrições utilizados.

4.1 ÍNDICES E PARÂMETROS

Nesta seção são apresentados os índices e parâmetros utilizados na formulação matemática do problema. A seguir encontram-se os índices aplicados aos parâmetros e variáveis:

j, k : índices dos caminhões $\{1, 2, \dots, n\}$;

i, l : índices das docas $\{0, 1, 2, \dots, m\}$;

v : índices das janelas de tempo;

O índice $i = 0$ representa uma doca fictícia que possui tempos de processamento iguais a zero, esta doca é aplicada na formulação matemática para garantir que todas as variáveis sejam calculadas corretamente. Com a finalidade de garantir o atendimento das condições impostas ao problema, optou-se por definir a recepção como uma doca, sendo representada por $i = 1$.

Os parâmetros são definidos a seguir:

n : número de caminhões;

m : número de docas;

b : número de janelas de tempo;

$p_{j,i}$: tempo de processamento do caminhão j na doca i ;

$O_{j,i}$: tipo de operação do caminhão j na doca i ;

$d_{l,i}$: tempo de deslocamento da doca l para a doca i ;

$w_{i,v}$: início da janela de tempo v na doca i ;

$dw_{i,v}$: duração da janela de tempo v na doca i ;

Os possíveis valores de $O_{j,i}$ são 0, 1, 2 e 3. O parâmetro assumirá o valor 0 para os casos em que o caminhão j não visita a doca i . O valor 1 indica o atendimento na

recepção. Os valores de 2 e 3 indicam operações de descarregamento e carregamento dos caminhões, respectivamente.

4.2 VARIÁVEIS

Nesta seção são apresentadas as variáveis consideradas na formulação matemática.

$$X_{j,i,l} = \begin{cases} 1, & \text{se o caminhão } j \text{ é designado para a doca } i \text{ após a operação na doca } l \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$Y_{j,i,k} = \begin{cases} 1, & \text{se o caminhão } j \text{ é designado após o caminhão } k \text{ na doca } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$Z_{j,i,v} = \begin{cases} 1, & \text{se o caminhão } j \text{ na doca } i \text{ é designado após a janela de tempo } v \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$C_{j,i}$: tempo de término da operação do caminhão j na doca i ;

T_j : tempo de término do caminhão j ;

S_j : tempo de início do caminhão j ;

$Dist_{j,i,l}$: tempo de deslocamento da doca l para a doca i no caminhão j ;

4.3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Nesta seção será apresentada a modelagem matemática desenvolvida para o problema tratado neste trabalho, bem como as descrições das restrições aplicadas ao modelo.

$$\text{Min } \sum_{j=1}^n T_j \quad (37)$$

Sujeito a:

$$Y_{j,i,k} + Y_{k,i,j} \leq 1 \quad \forall i, j, k \neq j \quad (38)$$

$$X_{j,i,l} + X_{j,l,i} \leq 1 \quad \forall j, i, l \neq i \quad (39)$$

$$X_{j,i,l} = 0 \quad \forall j, i, l \neq i \mid O_{j,l} > O_{j,i} \quad (40)$$

$$C_{j,0} = 0 \quad \forall j \quad (41)$$

$$S_j = C_{j,1} - p_{j,1} \quad \forall j \quad (42)$$

$$Dist_{j,i,l} = 0 \quad \forall j, i, l \mid p_{j,i} = 0 \quad (43)$$

$$Dist_{j,i,l} = d_{l,i} \quad \forall j, i, l \mid p_{j,i} \neq 0 \quad (44)$$

$$C_{j,i} \geq C_{j,l} + p_{j,i} + Dist_{j,i,l} - M * (1 - X_{j,i,l}) \quad \forall j, i, l \neq i \quad (45)$$

$$C_{j,l} \geq C_{j,i} + p_{j,l} + Dist_{j,i,l} - M * X_{j,i,l} \quad \forall j, i, l \neq i \quad (46)$$

$$C_{j,i} \geq C_{k,i} + p_{j,i} - M * (1 - Y_{j,i,k}) \quad \forall i, j, k \neq j \quad (47)$$

$$C_{k,i} \geq C_{j,i} + p_{k,i} - M * Y_{j,i,k} \quad \forall i, j, k \neq j \quad (48)$$

$$C_{j,i} - w_{i,v} - dw_{i,v} + M * (1 - Z_{j,i,v}) \geq p_{j+i} \quad \forall j, i, v \quad (49)$$

$$w_{i,v} + M * Z_{j,i,v} \geq C_{j,i} \quad \forall j, i, v \quad (50)$$

$$T_j \geq C_{j,i} \quad \forall j, i \quad (51)$$

$$X_{j,i,l} \in \{0,1\} \quad \forall j, i, l \neq i \quad (52)$$

$$Y_{j,i,k} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k \neq j \quad (53)$$

$$Z_{j,i,v} \in \{0,1\} \quad \forall j, i, v \quad (54)$$

A função objetivo (37) busca a minimização da soma dos tempos gastos pelos caminhões para realizar suas operações nas docas. As restrições (38) declaram que, para qualquer doca i , um caminhão não pode ser sucessor e predecessor de outro caminhão ao mesmo tempo. As restrições (39) possuem a mesma finalidade das restrições (38), mas voltadas para o sequenciamento de docas, ou seja, para qualquer caminhão j , uma doca não pode ser sucessora e predecessora de outra doca ao mesmo tempo.

As restrições (40) forçam a condição de que, para cada caminhão, a recepção e as docas que possuem tempo de processamento igual a 0 devem ser visitadas antes das outras docas, além de assegurar que, para cada caminhão, uma doca que receba uma operação de carregamento não poderá ser designada antes de uma doca que receba uma operação de descarregamento. Estas restrições buscam garantir que o caminhão já tenha realizado todas as operações de descarregamento antes de iniciar as operações de carregamento.

As restrições (41) determinam que o tempo de término de todos os caminhões será sempre 0 na doca 0. Como esta doca é fictícia, os caminhões não realizam nenhuma operação nela, e por isso não é considerado nenhum tempo de operação. Esta doca fictícia busca garantir que os tempos de término de cada caminhão em cada doca sejam calculados corretamente, respeitando os tempos de término das posições anteriores, bem como o tempo de processamento da posição atual.

As restrições (42) determinam o tempo de chegada dos caminhões. Como a recepção (doca 1) deve ser a primeira doca a ser visitada por todos os caminhões, determinou-se que o tempo de chegada de cada caminhão será o tempo de término na doca 1 menos o tempo de processamento desta doca. Esta decisão foi tomada com a finalidade de garantir que ao chegar na empresa, o caminhão seguirá direto para o atendimento na recepção, evitando um tempo de espera nesta etapa inicial.

As restrições (43) e (44) redefinem o tempo de deslocamento entre docas com a finalidade de garantir que não será considerado o tempo de deslocamento nos casos em que não há operação a ser realizada na doca. Quando um caminhão j possui tempo de processamento igual a zero ($p_{j,i} = 0$) na doca i , nenhuma operação é realizada nesta doca, portanto não há necessidade do caminhão se deslocar até a doca i . Neste caso, os tempos de deslocamento de todas as outras docas até a doca i serão considerados iguais a zero para o caminhão j . Para as docas nas quais os caminhões realizam uma operação de carregamento ou descarregamento, os tempos de deslocamento permanecem os mesmos daqueles pré-definidos no parâmetro $d_{l,i}$.

As restrições (45) e (46) são disjuntivas e buscam garantir que para cada caminhão j , a doca i é designada após a doca l , ou a doca l é designada após a doca i . As restrições também asseguram que o caminhão só irá para a próxima doca depois de finalizar a atividade na doca anterior. Isso evitará que uma operação em determinada doca seja interrompida durante sua execução para ir para outra doca, e posteriormente, precisar retornar para a doca que teve a operação interrompida.

As restrições (47) e (48) também são disjuntivas e garantem a continuidade das operações nas docas, ou seja, uma doca iniciará as operações do próximo caminhão apenas após a finalização das operações do caminhão anterior.

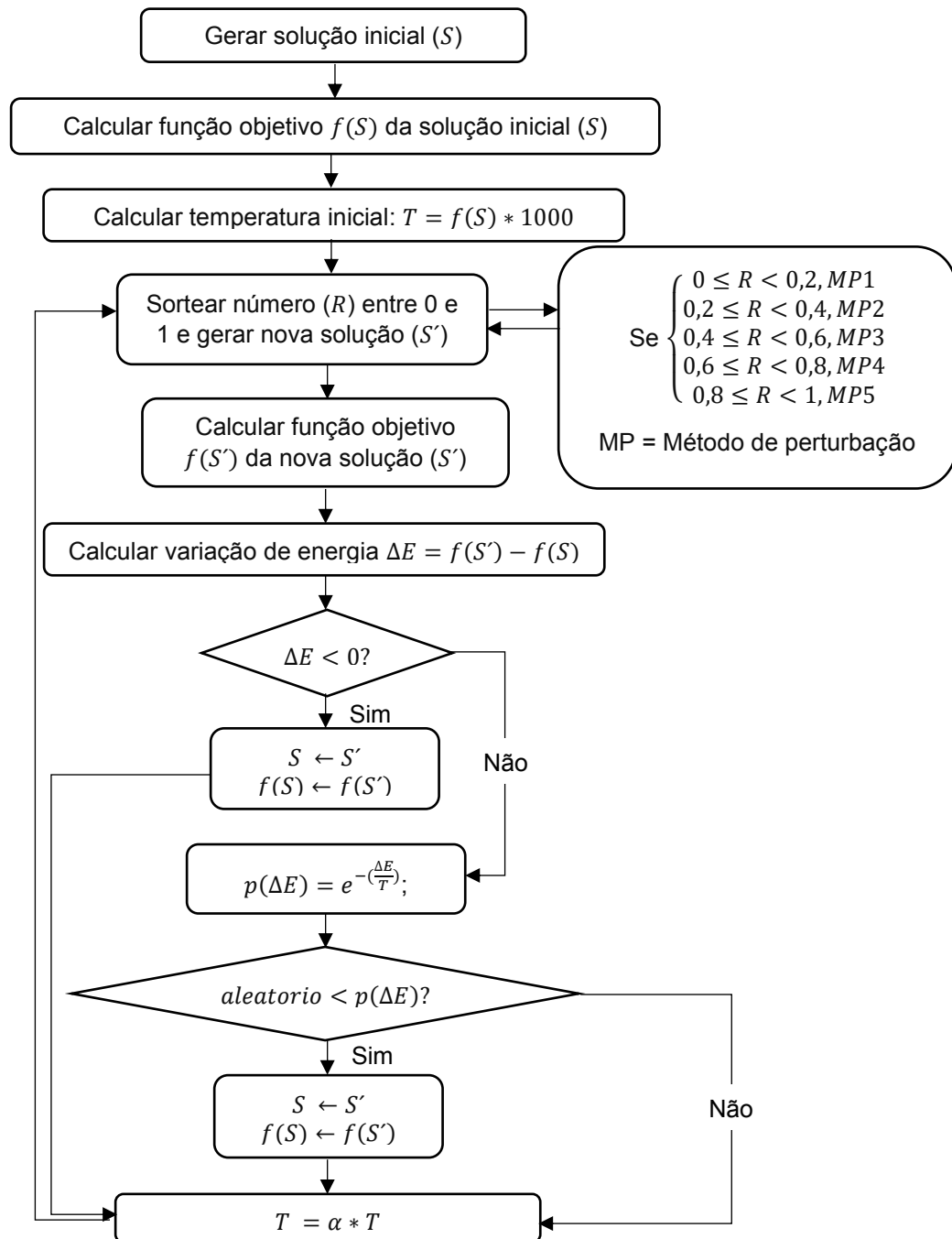
As restrições (49) e (50) tratam sobre as janelas de tempo e buscam assegurar que nenhum caminhão será designado para iniciar suas operações em uma doca durante as janelas de tempo, bem como garantir que as operações dos caminhões

terminem antes de iniciar as janelas de tempos, que são intervalos de tempo nas quais as docas estão inoperantes. As restrições (51) calculam o tempo total de término de cada caminhão. Os tempos de término dos caminhões nas docas são cumulativos, ou seja, o tempo de término da segunda doca da sequência para determinado caminhão considera o tempo de término da primeira doca acrescentando o tempo de processamento da segunda doca, e assim por diante. Com isso, pode-se concluir que o tempo de término do caminhão será o valor máximo dentre os tempos de terminos de todas as docas designadas para tal caminhão. As restrições (52) - (54) definem os tipos das variáveis.

5 ALGORITMO *SIMULATED ANNEALING* PROPOSTO

Esta seção tem o objetivo de apresentar a adaptação do algoritmo *Simulated Annealing* ao problema *open shop* proposta neste trabalho. Para a implementação computacional deste algoritmo, utilizou-se a linguagem de programação VBA do *software* Excel. A FIGURA 3 apresenta uma esquematização do algoritmo proposto.

FIGURA 3 – ESQUEMATIZAÇÃO ALGORITMO *SIMULATED ANNEALING*



FONTE: A autora (2021).

As próximas subseções apresentam as metodologias empregadas em cada etapa do algoritmo.

5.1 SOLUÇÃO INICIAL

Um dos parâmetros de entrada para o algoritmo *Simulated Annealing* é a solução inicial, e neste caso, trata-se da designação e sequenciamento dos caminhões às docas. O método utilizado para geração da solução inicial foi baseado na heurística NEH proposta por Nawaz et al. (1983).

Segundo Nawaz et al. (1983), a priorização no processo de designação de tarefas, ou caminhões no contexto deste trabalho, deve ser proporcional à soma dos tempos de processamento nas máquinas, ou docas. Os passos propostos pelos autores são:

1. Para cada tarefa (caminhão), calcular a soma dos tempos de processamento em todas as máquinas (docas) a serem visitadas;
2. Ordenar as tarefas (caminhões) da maior soma dos tempos de processamento para a menor;
3. Selecionar as duas primeiras tarefas (caminhões) e encontrar a melhor sequência por meio do cálculo da função objetivo;
4. Selecionar a próxima tarefa (caminhão) do passo 2 e encontrar a melhor posição para inserir esta tarefa (caminhão) na sequência encontrada no passo 3.

As soluções ótimas geradas pelo LINGO e pelo Gurobi também foram analisadas com a finalidade de identificar padrões que poderiam ser replicados na geração de soluções. Foi observado que a designação iniciava sempre com o caminhão que possuía menor tempo de processamento na doca 1, que representa a recepção e é a primeira doca a ser visitada por cada caminhão. Esta observação foi incluída como uma das etapas do método proposto para determinação da solução inicial.

Tendo como base esta observação das soluções ótimas e a heurística NEH, o método proposto neste trabalho para obtenção da solução inicial segue as seguintes etapas:

1. Determinar o caminhão que possui o menor tempo de processamento na doca 1 e incluir o caminhão na primeira posição da sequência de caminhões

- (Sc). Caso dois ou mais caminhões tenham o mesmo tempo de processamento, considera-se o primeiro caminhão analisado;
2. Para os outros caminhões, somar os tempos de processamentos em todas as docas a serem visitadas por cada caminhão;
 3. Ordenar os caminhões da menor soma dos tempos de processamento para a maior. Incluir esta ordenação na sequência de caminhões (Sc), a partir da posição 2, já que a posição 1 já foi determinada na etapa anterior;
 4. Para cada caminhão, ordenar as docas a serem visitadas de acordo com as restrições do problema, gerando uma sequência (Sd) de docas a serem visitadas para cada caminhão. A doca que representa a recepção deve ser a primeira a ser visitada, seguida das docas onde são realizadas operações de descarregamento e finalizando com as docas com operações de carregamento.

O resultado final desta etapa deve ser a sequência de docas a serem visitadas por cada caminhão. A informação obtida a partir dos passos apresentados anteriormente é estruturada em uma matriz nomeada *Ordem*. Sendo n o número de caminhões e m o número de docas, a matriz de solução inicial tem n linhas e $m + 1$ colunas. A primeira coluna da matriz informará a sequência ordenada de caminhões (Sc). Para cada linha, das colunas 2 até $m + 1$, estarão disponíveis a sequência de docas a serem visitadas por cada caminhão. Cabe ressaltar que mesmo se o tempo de processamento em determinada doca é nulo ainda assim esta doca estará relacionada na matriz *Ordem*.

5.2 FUNÇÃO OBJETIVO E CÁLCULO DA ENERGIA

Outro fator a ser definido antes da execução da metaheurística é a metodologia a ser aplicada para o cálculo da energia, ou seja, a função objetivo de cada configuração gerada durante a execução do algoritmo.

Considerando que a designação e o sequenciamento dos caminhões às docas já foram realizados, o próximo passo é a programação dos caminhões às docas, ou seja, a determinação dos tempos de início e término de cada caminhão em cada doca. Após o cálculo de todos estes tempos, esta etapa é finalizada com o cálculo da função objetivo, que é o somatório dos tempos de terminos de todos os caminhões na última doca visitada por cada caminhão.

O principal parâmetro de entrada para esta etapa é a matriz *Ordem* gerada na etapa anterior, contendo a sequência dos caminhões na primeira coluna e a sequência de docas a serem visitadas por cada caminhão no restante da matriz.

O processo de programação começa pelo primeiro caminhão da sequência ordenada (Sc), ou seja, pela primeira linha da primeira coluna da matriz, onde está disposta a ordem dos caminhões. O processo inicia com o cálculo do tempo de término deste caminhão na primeira doca a ser visitada, que se encontra na linha 1 e coluna 2 da matriz *Ordem*. Segue-se para o cálculo de tempo de término na próxima doca, que é o valor da linha 1 e coluna 3 da matriz, e assim por diante, até a coluna $m + 1$. Os cálculos dos tempos de término nas docas consideram as janelas de tempo existentes em cada doca e garantirá que não haja operações nas docas durante estes intervalos de parada.

O cálculo do tempo de término em cada doca segue alguns passos a fim de determinar o momento em que a doca e o caminhão estão disponíveis para iniciar a operação.

O primeiro passo é verificar se a doca analisada é a primeira a ser visitada pelo caminhão. Se sim, determina-se o instante de término do caminhão designado anteriormente a esta doca. Este instante passa a ser o novo momento de disponibilidade para o caminhão e doca atual. Se a doca não é a primeira a ser visitada, verifica-se o instante de término na última doca visitada pelo caminhão e acrescenta-se o tempo de deslocamento da doca anterior até a atual, sendo o resultado considerado como a nova disponibilidade.

Esta nova disponibilidade é então comparada ao tempo de término do último caminhão que passou pela doca atual. Se o tempo de término deste caminhão for maior que a disponibilidade calculada anteriormente, este término passa a ser a nova disponibilidade para a doca e caminhão atuais.

Por fim, compara-se a disponibilidade com os tempos de intervalo da doca atual. Caso o momento de disponibilidade da doca esteja entre o início e o fim da janela de tempo, ou se o período de execução da operação conflitar com a janela de tempo, a disponibilidade do caminhão na doca atual passa a ser o término da janela de tempo.

Finalizada a programação de todas as docas do primeiro caminhão, segue-se para a programação do caminhão que se encontra na segunda linha e primeira coluna da matriz *Ordem*, e assim por diante, até o último caminhão da matriz.

Tendo todos os tempos de términos calculados, determina-se o tempo de término total para cada caminhão, que é o tempo de término da última doca visitada por cada caminhão. Esta etapa é finalizada com o cálculo da função objetivo, que é o somatório dos tempos de términos totais de todos os caminhões.

5.3 MÉTODOS DE PERTURBAÇÃO

Segundo Franzin e Stützle (2019), o *Simulated Annealing* (SA) é um algoritmo estocástico de busca local, ou seja, o algoritmo começa com uma solução inicial gerada aleatoriamente, e a cada iteração, a vizinhança da solução atual é explorada de modo a determinar uma nova solução. A determinação da nova solução é geralmente obtida a partir de uma perturbação na solução atual.

Os métodos de exploração na vizinhança dependem da natureza do problema que está sendo resolvido. Neste trabalho, foram propostos 5 métodos de perturbação baseados nos trabalhos dos autores Liao et al. (2013) e Fuchigami (2011), e todos os métodos consideram como base a matriz *Ordem* gerada na etapa anterior. Considerando as restrições de precedência entre as docas em relação ao tipo de operação exercida nas docas (docas onde são realizadas operações de descarregamento devem ser visitadas antes das docas nas quais são realizadas operações de carregamento), as perturbações na sequência de docas a serem visitadas por cada caminhão (alterações nas colunas da matriz) tornam-se mais difíceis. Portanto, os métodos de perturbação buscam gerar novas soluções por meio da reorganização dos caminhões (alterações nas linhas da matriz).

O primeiro método (MP1) seleciona aleatoriamente dois números, que representam duas linhas da matriz *Ordem*, e consequentemente dois caminhões, e trocam as linhas entre si.

A FIGURA 4 apresenta um exemplo com 7 caminhões e 5 docas, sendo uma fictícia, a primeira coluna apresenta a ordem dos caminhões. A designação inicia pela primeira linha, com o caminhão 5. Este caminhão inicia seu percurso pela doca 4, seguido pela doca 5 e assim por diante até finalizar na doca 2. Pelo método MP1, foram selecionados dois números aleatórios, por exemplo 3 e 6, e essas linhas são trocadas entre si, ou seja, a linha 6 passa a ocupar a linha 3 e vice-versa.

FIGURA 4 – MÉTODO DE PERTURBAÇÃO MP1

5	4	0	1	3	2
1	3	0	1	4	2
3	2	0	1	4	3
6	2	0	1	4	3
4	4	0	1	2	3
7	4	0	1	2	3
2	0	1	2	3	4

5	4	0	1	3	2
1	3	0	1	4	2
7	4	0	1	2	3
6	2	0	1	4	3
4	4	0	1	2	3
3	2	0	1	4	3
2	0	1	2	3	4

FONTE: A autora (2021).

O segundo método (MP2) gera um número aleatório, sendo a linha da matriz *Ordem*. Esta perturbação, troca a linha selecionada com a linha imediatamente posterior, como pode-se visualizar na FIGURA 5, sendo tomado como exemplo a geração do número aleatório 3.

FIGURA 5 – MÉTODO DE PERTURBAÇÃO MP2

5	4	0	1	3	2
1	3	0	1	4	2
3	2	0	1	4	3
6	2	0	1	4	3
4	4	0	1	2	3
7	4	0	1	2	3
2	0	1	2	3	4

5	4	0	1	3	2
1	3	0	1	4	2
6	2	0	1	4	3
3	2	0	1	4	3
4	4	0	1	2	3
7	4	0	1	2	3
2	0	1	2	3	4

FONTE: A autora (2021).

O terceiro método (MP3) gera dois números aleatórios, de modo a formar uma subsequência entre as linhas da matriz *Ordem*, em seguida a ordem dos caminhões desta subsequência é invertida. No exemplo da FIGURA 6, foram gerados os números 1 e 5, formando a subsequência das linhas 1 até a 5 da matriz. Aplicando este método, a linha 5 passa a ser a linha 1 e a linha 1 passa a ser a linha 5; a linha 4 passa a ser a linha 2 e a linha 2 passa a ser a linha 4; e assim por diante, até inverter toda a subsequência.

FIGURA 6 – MÉTODO DE PERTURBAÇÃO MP3

5	4	0	1	3	2
1	3	0	1	4	2
3	2	0	1	4	3
6	2	0	1	4	3
4	4	0	1	2	3
7	4	0	1	2	3
2	0	1	2	3	4

4	4	0	1	2	3
6	2	0	1	4	3
3	2	0	1	4	3
1	3	0	1	4	2
5	4	0	1	3	2
7	4	0	1	2	3
2	0	1	2	3	4


FONTE: A autora (2021).

O quarto método (MP4) seleciona dois números aleatórios, remove a linha do primeiro número aleatório selecionado e insere-a logo após a linha do segundo

número aleatório, como ilustra a FIGURA 7, sendo 1 e 6 os números selecionados no exemplo.

FIGURA 7 – MÉTODO DE PERTURBAÇÃO MP4

5	4	0	1	3	2
1	3	0	1	4	2
3	2	0	1	4	3
6	2	0	1	4	3
4	4	0	1	2	3
7	4	0	1	2	3
2	0	1	2	3	4



1	3	0	1	4	2
3	2	0	1	4	3
6	2	0	1	4	3
4	4	0	1	2	3
7	4	0	1	2	3
5	4	0	1	3	2
2	0	1	2	3	4


FONTE: A autora (2021).

O último método de perturbação (MP5) proposto foca na sequência de docas visitadas pelos caminhões, e busca propor uma nova sequência de modo a continuar a atender as restrições de visitas às docas. Este método seleciona aleatoriamente um número (caminhão). Se o caminhão possuir mais de duas atividades de descarregamento por exemplo, seleciona-se aleatoriamente duas destas docas e inverte a ordem de visita entre estas docas. A mesma lógica aplica-se para operações de carregamento.

A TABELA 1 ilustra as operações que cada caminhão (C) executa em cada doca (D). Os valores 1, 2 e 3 indicam respectivamente, atendimento na recepção, operação de descarregamento e operação de carregamento. O valor 0 indica que o caminhão não visita a doca. A doca 0 representa a doca fictícia.

FIGURA 8 – MÉTODO DE PERTURBAÇÃO MP5

5	4	0	1	3	2
1	3	0	1	4	2
3	2	0	1	4	3
6	2	0	1	4	3
4	4	0	1	2	3
7	4	0	1	2	3
2	0	1	2	3	4



1	3	0	1	4	2
3	2	0	1	4	3
6	2	0	1	4	3
4	4	0	1	2	3
7	4	0	1	2	3
5	4	0	1	3	2
2	0	1	3	2	4

FONTE: A autora (2021).

TABELA 1 – TIPOS DE OPERAÇÃO – 7 CAMINHÕES E 5 DOCAS (1 FICTÍCIA)

	D0	D1	D2	D3	D4
C1	0	1	3	0	2
C2	0	1	2	2	3
C3	0	1	0	3	2
C4	0	1	2	2	0
C5	0	1	3	2	0
C6	0	1	0	3	2
C7	0	1	2	3	0

FONTE: A autora (2020).

Na FIGURA 8, o número 7 foi selecionado como exemplo, correspondendo ao caminhão 2. Analisando os dados da TABELA 1, o caminhão 2 executa duas operações de descarregamento nas docas 2 e 3, e uma operação de carregamento na doca 4. Ao observar a tabela posicionada à esquerda da FIGURA 8, pode-se observar que a doca 2 é visitada antes da doca 3. A aplicação do método MP5 inverte a ordem de visitação para estas docas. Após a doca 1, o caminhão seguirá para a doca 3, em seguida para a doca 2 e finalizará seu percurso na doca 4.

A escolha do método de perturbação a ser utilizado em cada iteração é realizada de modo probabilístico por meio do sorteio de um número entre 0 e 1. Para que cada método tenha aproximadamente a mesma probabilidade de ser escolhido, os métodos foram segregados em intervalos entre 0 e 1. Se o número sorteado for maior que 0 e menor que 0,2, o método MP1 será escolhido; maior ou igual a 0,2 e menor que 0,4, o método MP2 é escolhido; maior ou igual a 0,4 e menor que 0,6, escolhe-se o método MP3; maior ou igual a 0,6 e menor que 0,8, o método MP4, e maior ou igual a 0,8 e menor que 1, utiliza-se o método MP5.

5.4 OUTROS CRITÉRIOS

A execução do algoritmo requer a definição de outros parâmetros, como temperatura inicial, fator de redução de temperatura e critério de parada.

De acordo com Franzin e Stützle (2019), a temperatura inicial deve ser proporcional à função objetivo da solução inicial encontrada para o problema em questão. Desta forma, a temperatura inicial é definida como 1000 vezes maior que o valor da função objetivo para a solução inicial ($T = f(S) * 1000$). O fator de redução

de temperatura foi definido em $\alpha = 0,99$ de acordo com as orientações dos autores de que os valores devem ser maiores que 0,9. O último fator a ser decidido é o critério de parada. Para este trabalho, o critério de parada foi definido como o alcance de temperatura mínima, pré-definida como 0,001.

6 RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados do modelo exato, tanto os valores obtidos pelo *software* LINGO (versão 18.0) quanto pelo Gurobi (versão 9.1.0), para ilustrar a observância do modelo proposto às restrições impostas, além de apresentar um comparativo de desempenho computacional entre os dois *softwares*. Os testes computacionais foram realizados em um notebook, com *Intel Celeron* N2815 (1.86GHz), RAM 4GB, sistema operacional *Microsoft Windows*.

Em seguida, são apresentados os resultados obtidos pela heurística *Simulated Annealing*, bem como a comparação entre estes resultados com os resultados do modelo exato, tanto os valores da função objetivo, quanto os tempos de execução, de modo analisar a eficácia da heurística proposta.

6.1 MODELO EXATO

A seguir, são apresentados alguns resultados obtidos pelo *software* LINGO. O primeiro conjunto de dados testado considera 5 caminhões e 5 docas, sendo uma doca fictícia e uma doca representando a recepção (doca 1).

Os dados do problema foram gerados por meio da função de geração de número *aleatório* do Excel. As operações dos caminhões (representados pela letra C) nas docas (representadas pela letra D) têm os tempos de processamento apresentados na TABELA 2. Tempos de processamento com valor 0 indicam que o caminhão não realiza operação na doca. Os tempos de deslocamento entre docas encontram-se na TABELA 3, onde a doca de origem está disposta na linha e a doca de destino, na coluna. Como o valor 0 representa a doca fictícia, os tempos de deslocamento desta doca até as outras e das outras docas até a doca 0 são iguais a zero.

TABELA 2 – TEMPOS DE PROCESSAMENTO – 5 CAMINHÕES E 5 DOCAS (1 FICTÍCIA)

	D0	D1	D2	D3	D4
C1	0	4	21	0	19
C2	0	20	19	28	10
C3	0	23	0	20	3
C4	0	29	22	9	0
C5	0	15	22	6	0

FONTE: A autora (2020).

TABELA 3 – TEMPOS DE DESLOCAMENTO ENTRE DOCAS

	D0	D1	D2	D3	D4
D0	0	0	0	0	0
D1	0	0	8	5	4
D2	0	8	0	4	3
D3	0	5	4	0	10
D4	0	4	3	10	0

FONTE: A autora (2020).

Os tipos de operação de cada caminhão em cada doca estão disponíveis na TABELA 4. O valor 0 indica os casos em que o caminhão não visita a doca. O valor 1 representa o atendimento na recepção. E os valores de 2 e 3 indicam operações de descarregamento e carregamento dos caminhões, respectivamente.

TABELA 4 – TIPOS DE OPERAÇÃO

	D0	D1	D2	D3	D4
C1	0	1	3	0	2
C2	0	1	2	2	3
C3	0	1	0	3	2
C4	0	1	2	2	0
C5	0	1	3	2	0

FONTE: A autora (2020).

O problema também considera janelas de tempo. Foi simulado que as docas 2 e 3 têm duas janelas de tempo cada uma. Os instantes de início das janelas de tempo para cada doca podem ser observados na TABELA 5. A doca 2 inicia a primeira janela de tempo no instante 55 e a segunda janela inicia no instante 95. A doca 3 também possui duas janelas de tempo iniciando nos instantes 45 e 120. As durações das janelas de tempo, em minutos, encontram-se na TABELA 6.

TABELA 5 – INSTANTES DE INÍCIO DAS JANELAS DA TEMPO

	w_{i1}	w_{i2}
D0	0	0
D1	0	0
D2	55	95
D3	45	120
D4	0	0

FONTE: A autora (2020).

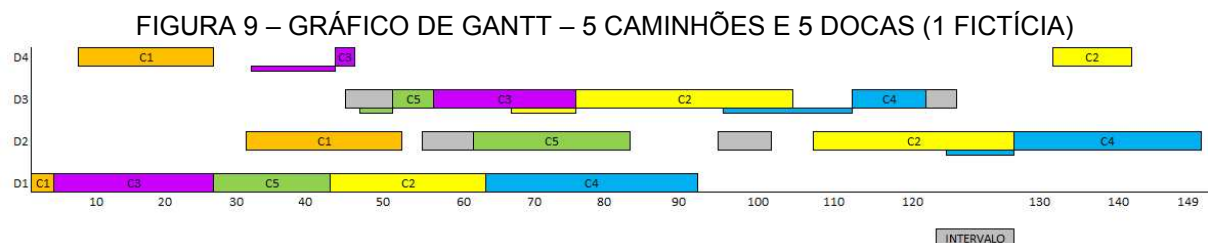
TABELA 6 – DURAÇÃO DAS JANELAS DA TEMPO

	dw_{i1}	dw_{i2}
D0	0	0
D1	0	0
D2	5	5
D3	5	5
D4	0	0

FONTE: A autora (2020).

A FIGURA 9 ilustra um gráfico de Gantt com o sequenciamento dos caminhões das docas, início e fim das operações de cada caminhão em cada doca. Cada linha do eixo vertical representa uma doca, enquanto o eixo horizontal indica os instantes de tempo. Cada retângulo colorido com um código dentro (C_j), indica uma operação do caminhão j . Os retângulos coloridos sem código de referência de caminhão e com alturas menores, representam os tempos de espera dos caminhões, ou seja, o tempo em que os caminhões chegam na doca até o tempo de iniciar suas operações.

Pode-se observar que as condições impostas ao problema são atendidas pelo modelo matemático. Todos os caminhões iniciam seu roteiro na recepção, doca 1, e a programação das docas respeita a restrição de que docas que recebem operação de descarregamento sejam designadas antes de docas que realizem operações de carregamento. Por exemplo, o caminhão 5, representado pela cor verde na FIGURA 9, realiza uma operação de descarregamento na doca 3 e uma operação de carregamento na doca 2, além de ter que passar obrigatoriamente pela doca 1. Observando a programação de docas para este caminhão na FIGURA 9, pode-se visualizar que a doca 1 é a primeira a ser visitada pelo caminhão. Em seguida, o caminhão desloca-se para a doca 3 e finaliza seu roteiro na doca 2, no instante 82.



FONTE: A autora (2020).

As restrições de janelas de tempo também são respeitadas pelo modelo. Observando por exemplo a doca 2 na FIGURA 9, a operação do caminhão 1 termina

antes do início da janela de tempo que se inicia no instante 55. O caminhão 5 é o próximo designado para esta doca e sua operação inicia apenas após o término da janela de tempo no instante 60.

Os instantes de término total das operações de cada caminhão podem ser observados na TABELA 7. Estes valores representam o instante de término da última doca designada para o caminhão. A função objetivo para este problema foi de 498, representando o tempo total gasto por todos os caminhões para realizarem suas operações de carregamento e descarregamento nas docas.

TABELA 7 – INSTANTE DE TÉRMINO NA ÚLTIMA DOCA DESIGNADA

Caminhão	Término
1	51
2	140
3	76
4	149
5	82

FONTE: A autora (2020).

Os testes continuaram sendo realizados para conjuntos maiores ainda com a finalidade de validar o modelo proposto. A maior base de dados para a qual o *software* LINGO encontrou a solução ótima possuía 8 caminhões e 6 docas. Os resultados para essa base de dados são detalhados a seguir. Para bases de dados a partir de 9 caminhões e 6 docas, o *software* não foi capaz de encontrar a solução ótima em um tempo inferior a 24 horas.

Os tempos de processamento de cada caminhão para cada doca são apresentados na TABELA 8 e os tipos de operações, na TABELA 9. Como no exemplo anterior, a doca 0 também representa uma doca fictícia. Além disso, o problema possui as mesmas janelas de tempo do exemplo anterior, com tempos de início e de duração apresentados nas TABELAS 5 e 6, respectivamente.

TABELA 8 – TEMPOS DE PROCESSAMENTO – 8 CAMINHÕES E 6 DOCAS (1 FICTÍCIA)

	D0	D1	D2	D3	D4	D5
C1	0	4	21	0	19	28
C2	0	20	19	28	10	0
C3	0	23	0	20	3	8
C4	0	29	22	9	0	4
C5	0	15	22	6	0	17
C6	0	8	0	19	24	0
C7	0	27	31	3	0	19
C8	0	9	6	20	14	0

FONTE: A autora (2020).

TABELA 9 – TIPOS DE OPERAÇÃO – 8 CAMINHÕES E 6 DOCAS (1 FICTÍCIA)

	D0	D1	D2	D3	D4	D5
C1	0	1	3	0	2	3
C2	0	1	2	2	3	0
C3	0	1	0	3	2	3
C4	0	1	2	2	0	3
C5	0	1	3	2	0	2
C6	0	1	0	3	2	0
C7	0	1	2	3	0	3
C8	0	1	2	3	2	0

FONTE: A autora (2020).

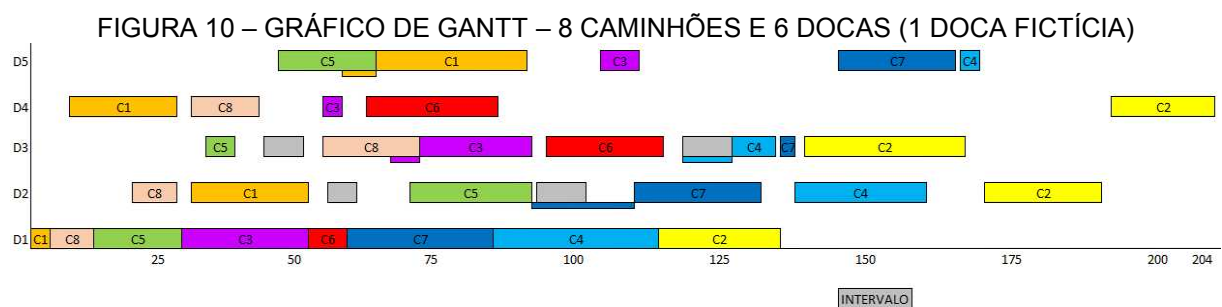
Os tempos de término das operações dos caminhões em cada doca podem ser observados na TABELA 10. Analisando estes resultados, pode-se assegurar que as operações que possuem tempo de processamento igual a zero não impactam o cálculo dos tempos de terminos das outras operações. Para estas combinações de caminhões e docas, o tempo de término é sempre zero, uma vez que o caminhão não precisa passar por tais docas pois não realiza operação nas mesmas.

TABELA 10 – INSTANTES DE TÉRMINO – 8 CAMINHÕES E 6 DOCAS (1 FICTÍCIA)

	D0	D1	D2	D3	D4	D5
C1	0	4	51	0	27	93
C2	0	135	191	168	204	0
C3	0	51	0	94	58	111
C4	0	115	160	134	0	171
C5	0	28	94	39	0	65
C6	0	59	0	116	87	0
C7	0	86	131	138	0	166
C8	0	13	27	74	44	0

FONTE: A autora (2020).

A função objetivo para este problema foi de 1029. Este valor é obtido pela soma dos maiores valores de cada linha da TABELA 10, que representam os instantes de término da última doca percorrida por cada caminhão. Considerando o caminhão 4 como exemplo, além da passagem obrigatória pela doca 1, este caminhão deve percorrer também as docas 2, 3 e 5. Nas docas 2 e 3, o caminhão 2 realiza operações de descarregamento e na doca 5, operação de carregamento. Como o caminhão não realiza operação na doca 4, pode-se visualizar na TABELA 10, que o tempo de término nesta doca é igual a zero, bem como o tempo de término na doca 0, que representa a doca fictícia.



FONTE: A autora (2020).

Analisando a programação do caminhão 4, representado pela cor azul mais clara na FIGURA 10, pode-se observar o atendimento às restrições. O roteiro deste caminhão inicia pela doca 1 e as operações de descarregamento são designadas antes da operação de carregamento, ou seja, as docas 2 e 3 são visitadas antes da doca 5. A programação deste caminhão também respeita a janela de tempo da doca 3. O caminhão finalizou suas operações na primeira doca visitada (doca 1) no instante

115, e seguiu para a doca 3. O tempo de deslocamento da doca 1 até a doca 3 é de 5 unidades de tempo, conforme disposto na TABELA 11; portanto, o caminhão 4 estaria disponível para realizar suas operações na doca 3 no instante de tempo 120. Entretanto, uma janela de tempo é iniciada no instante 120, fazendo com o caminhão tenha que esperar até o instante 125, instante de término da janela de tempo, para iniciar sua operação. Esta espera pode ser visualizada na FIGURA 10 pelo retângulo azul mais claro de menor altura disposto na linha logo abaixo da linha referente à doca 3.

TABELA 11 – TEMPOS DE DESLOCAMENTO – 8 CAMINHÕES E 6 DOCAS (1 FICTÍCIA)

	D0	D1	D2	D3	D4	D5
D0	0	0	0	0	0	0
D1	0	0	8	5	4	6
D2	0	8	0	4	3	7
D3	0	5	4	0	10	9
D4	0	4	3	10	0	2
D5	0	6	7	9	2	0

FONTE: A autora (2020).

6.2 COMPARAÇÃO ENTRE RESOLUÇÃO ÓTIMA E SUBÓTIMA

Como já citado, o LINGO apresentou limitação de resolução. Esta limitação está relacionada principalmente ao desempenho computacional do *software*, que foi capaz de resolver problemas com no máximo 8 caminhões e 6 docas dentro de um tempo aceitável menor que 24 horas.

Há outros *softwares* de otimização disponíveis, que apresentam um desempenho computacional melhor, sendo capazes de determinar a solução ótima com menor tempo de execução computacional. Um exemplo destes *softwares* é o Gurobi, que também foi escolhido para ser utilizado como meio de obter as soluções ótimas para o modelo exato proposto neste trabalho.

Considerando que o modelo matemático já estava programado no LINGO, optou-se por não utilizar uma linguagem específica para a programação no Gurobi, e sim gerar arquivos no formato LP a partir da programação do LINGO, um dos formatos de arquivos que o Gurobi é capaz de ler. O formato LP é de um arquivo de texto que estrutura um programa linear e/ou programa de número inteiro misto de forma

algébrica. As mesmas instâncias de problemas geradas e resolvidas pelo LINGO foram utilizadas pelo Gurobi para possibilitar uma melhor comparação.

Entretanto, a resolução exata não se torna viável para todos os exemplos. O problema de programação de caminhões é classificado como *NP-hard*, isto significa que o aumento do tamanho do problema causa um aumento exponencial no tempo de resolução de um algoritmo exato (BODNAR et al., 2015). Exemplificando esta afirmação com os problemas deste trabalho, o modelo matemático para o problema de 5 caminhões e 5 docas apresenta 257 variáveis e 761 restrições; enquanto o modelo do problema com 8 caminhões e 6 docas possui 664 variáveis e 2033 restrições.

Ao aumentar o número de caminhões e docas no problema, o tempo requerido para resolução aumenta tanto que a resolução exata se torna praticamente ineficiente. Com isso, a implementação de heurísticas e/ou metaheurísticas surge como um meio de obter soluções boas com tempos de performance significativamente menores. O modelo do problema com 5 caminhões e 5 docas apresentou

Com base nisso, a metaheurística *Simulated Annealing* (SA) foi implementada em Excel, na linguagem VBA e foi executada para as mesmas bases de dados utilizadas na resolução exata pelos softwares LINGO e Gurobi. Além de comparar os tempos de performance, os resultados obtidos pela metaheurística também foram comparados às soluções ótimas, por meio da equação (55) de GAP:

$$GAP = \frac{Solução\ SA - Solução\ Ótima}{Solução\ SA} \times 100 \quad (55)$$

A TABELA 12 apresenta uma comparação dos resultados e dos tempos de performance obtidos pela metaheurística proposta e pelos softwares de resolução exata para problemas de diversas dimensões, ressaltando que o número de docas inclui uma doca fictícia e a recepção.

TABELA 12 – COMPARAÇÃO ENTRE OS SOFTWARES DE RESOLUÇÃO EXATA E *SIMULATED ANNEALING*

Caminhões	Docas (1 fictícia)	Solução Ótima	Tempo (s) LINGO	Tempo (s) GUROBI	Função Objetivo SA	GAP (%)	Tempo (s) SA
5	5	498	3,55	0,44	503	1,0%	10,09
6	5	627	33,07	1,31	634	1,1%	10,42
7	5	800	68,69	1,95	809	1,1%	11,16
7	6	893	238,32	3,22	909	1,8%	11,77
8	6	1029	2674,82	29,95	1063	3,2%	12,2
9	6	1223	62859,92	950,00	1269	3,6%	13,12
10	6	1382	-	5509,64	1432	3,5%	14,13

FONTE: A autora (2021).

Como pode-se observar na TABELA 12, o Gurobi apresentou melhor desempenho computacional que o LINGO ao retornar as soluções ótimas com menor tempo de performance. Para o problema que possuía 7 caminhões e 5 docas, o LINGO retornou a solução ótima com 68 segundos e 69 milissegundos; enquanto o Gurobi retornou a solução para o mesmo problema com apenas 1 segundo e 95 milissegundos.

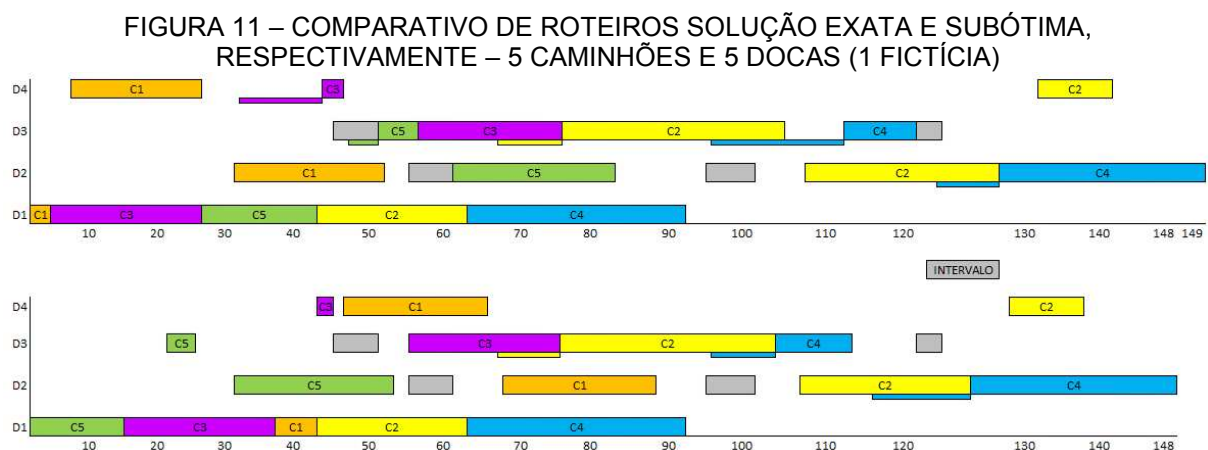
A última linha da TABELA 12 não apresenta valor para a coluna do LINGO, pois, o *software* não foi capaz de retornar a solução ótima para o problema de 10 caminhões e 6 docas dentro de 24 horas. Apesar de o Gurobi apresentar melhor desempenho computacional, este *software* também apresentou limitações de resolução. A maior instância que o *software* foi capaz de resolver foi 10 caminhões e 6 docas; a resolução do problema com 11 caminhões e 6 docas demandou um tempo superior a 48 horas.

Com base nestes resultados, a próxima etapa consistiu na implementação da metaheurística *Simulated Annealing*. Conforme esperado, a metaheurística apresentou tempos de performances menores quando comparados à resolução exata de problemas de grandes dimensões. Considerando o problema de 9 caminhões e 6 docas como exemplo na TABELA 12, a resolução exata demandou 62.859,92 segundos no LINGO e 950 segundos no Gurobi, enquanto a metaheurística SA retornou o melhor resultado em 13,12 segundos. A solução retornada pelo SA, de 1269, não é a ótima, mas aproxima-se do valor ótimo de 1223, com um GAP de 3,6% aproximadamente.

Os resultados do *Simulated Annealing* também foram dispostos em gráficos de Gantt de modo a permitir uma análise visual das programações dos caminhões e consequentemente, verificar se o algoritmo proposto atende todas as restrições do problema.

A FIGURA 11 ilustra dois gráficos de Gantt para o problema de 5 caminhões e 5 docas, sendo o primeiro referente à solução ótima, e o segundo, à metaheurística. Os dois gráficos foram dispostos na mesma imagem para facilitar a comparação entre os percursos gerados em ambas as soluções.

O caminhão 1, representado pela cor laranja na FIGURA 11, deve passar pelas docas 2 e 4, nas quais executam operações de carregamento e descarregamento, respectivamente; além da doca 1, que é obrigatória a todos os caminhões. O caminhão inicia seu percurso na doca 1, a recepção, segue para a doca 4, e finaliza o roteiro na doca 2, atendendo a restrição de precedência de operações.

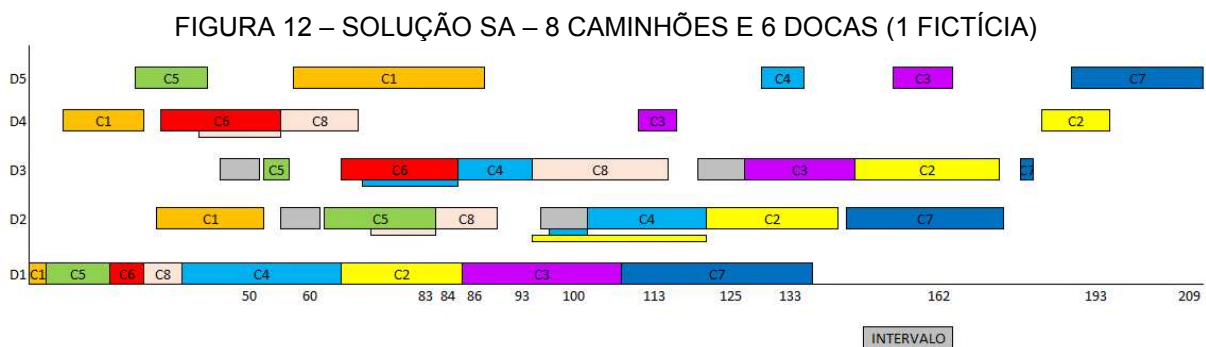


FONTE: A autora (2021).

Avaliando o percurso do caminhão 4 (representado pela cor azul) para a solução da metaheurística, conclui-se que os tempos de deslocamento e as disponibilidades dos caminhões e docas também são respeitados e considerados para o cálculo dos tempos de término. O caminhão 4 finaliza as operações na doca 1 no instante 91, e a próxima doca a ser visitada é a doca 3. O tempo de deslocamento entre as docas 1 e 3 é de 5 unidades de tempo, fazendo com que o caminhão 4 esteja disponível para iniciar suas operações na doca 3 no instante 96. Entretanto, neste instante de tempo, a doca 3 está ocupada com o caminhão 2, que finaliza suas operações no instante 103; somente então o caminhão 4 pode iniciar suas atividades.

É possível visualizar ainda na FIGURA 11 que a solução da metaheurística apresentou muita similaridade à solução ótima. A maior diferença relacionou-se com a sequência dos caminhões 1 e 5. Enquanto a programação da solução ótima iniciou pelo caminhão 1, a solução da metaheurística inicia pelo caminhão 5, trocando de posição com o caminhão 1 quando comparada à solução ótima. Os demais caminhões mantiveram as mesmas posições nas sequências de programações das docas

Como pode-se observar na FIGURA 12, que exemplifica a simulação com 8 caminhões e 6 docas, todos os caminhões iniciam seus roteiros pela doca 1 (recepção), conforme estipulado. Ao avaliar as programações do caminhão 4, pode-se concluir que as restrições relacionadas às janelas de tempo também são respeitadas. O caminhão inicia seu roteiro na doca 1 e segue para a doca 3, na qual finaliza suas operações no instante 93. A próxima doca designada para o caminhão é a doca 2. O tempo de deslocamento da doca 3 para a doca 2 é de 4 unidades de tempo. Entretanto, ao chegar à doca 2, a doca encontra-se no intervalo de parada, que inicia no instante 95 e finaliza no instante 100. Devido à janela de tempo, o caminhão 4 inicia suas operações na doca 2 apenas após a finalização do intervalo. O tempo de espera entre o instante de chegada à doca até o início das operações é representado pelo retângulo de cor azul mais clara disposto logo abaixo da linha que representa a doca 2.



FONTE: A autora (2021).

A melhor função objetivo encontrada pelo algoritmo SA para o problema de 8 caminhões e 6 docas foi de 1063. Diferente do que foi observado na solução do SA para o problema de 5 caminhões e 5 docas, a solução da metaheurística para 8 caminhões e 6 docas apresentou mais diferenças na sequência dos roteiros quando comparada à solução ótima. As diferenças entre roteiros são justificáveis pois o

número de combinações de rotas aumenta conforme o número de caminhões e docas aumentam.

A TABELA 13 apresenta os instantes de término dos caminhões para a solução ótima e também para a melhor solução da metaheurística. Ao comparar os instantes de término das duas soluções, pode-se observar diferenças significativas. Por exemplo, o instante de término na última doca visitada pelo caminhão 8 foi 74 pela solução ótima, enquanto que no *Simulated Annealing*, o caminhão finaliza suas operações no instante 113.

TABELA 13 – INSTANTES DE TÉRMINO – SOLUÇÃO ÓTIMA E SA – 8 CAMINHÕES E 6 DOCAS (1 FICTÍCIA)

Caminhão	Solução Ótima	SA
1	93	86
2	204	193
3	111	162
4	171	133
5	94	83
6	116	84
7	166	209
8	74	113

FONTE: A autora (2021).

Apesar das diferenças, a função objetivo da solução encontrada pelo algoritmo *Simulated Annealing* apresentou um GAP de 3,2%, relativamente baixo, quando comparada ao valor de 1029 da solução ótima.

Na realidade, as empresas possuem diversas docas em suas instalações e recebem dezenas, ou até mesmo centenas de caminhões e fornecedores por dia. Com a finalidade de aproximar os testes das dimensões reais e finalizar a avaliação da metaheurística proposta, o algoritmo foi executado para problemas de maiores dimensões. A TABELA 14 apresenta os resultados obtidos para diversas instâncias de problemas.

TABELA 14 – RESULTADOS *SIMULATED ANNEALING* PARA PROBLEMAS MAIORES

Caminhões	Docas (1 fictícia)	Função Objetivo	Tempo (s)
20	8	8262	102,35
50	10	40726	1022,16
70	12	75438	2461,88
75	15	91282	3811,57
80	15	98481	4439,96

FONTE: A autora (2021).

Não é possível calcular o GAP para estes exemplos uma vez que os softwares de otimização não são capazes de retornar as soluções ótimas em tempos viáveis. Entretanto ressalta-se a rapidez com que a metaheurística é capaz de resolver problemas maiores. O problema com 75 caminhões e 15 docas (sendo uma doca fictícia e a recepção), demandou um tempo computacional de aproximadamente 3812 segundos, equivalente a pouco mais de 1 hora.

7 CONCLUSÃO

O sequenciamento e a programação das atividades apresentam uma grande importância para as empresas e podem ser aplicados a empresas de diversos setores e em diferentes áreas da mesma empresa. É comum para as companhias executarem estas atividades de forma manual e empírica, o que demanda tempo do funcionário responsável pela atividade, além de poder gerar gargalos no processo produtivo, altos tempos de esperas para os equipamentos e profissionais, e aumento de custos para a empresa.

A existência de um método estruturado para estas etapas do Planejamento e Controle da Produção pode trazer melhorias significativas para as empresas, como um fluxo de atividades mais fluído, sem presença de gargalos e desperdícios, automatização de atividades, redução nos tempos de execução das atividades, tempos de espera e até mesmo nos custos da empresa.

O presente artigo buscou propor um modelo matemático para o problema de sequenciamento e programação de caminhões a docas com janelas de tempo, de modo a minimizar o tempo de permanência dos motoristas dentro da empresa e resolvê-lo de maneira exata e subótima. O modelo matemático foi desenvolvido de modo a possibilitar a adaptação para empresas de diversos setores.

O modelo matemático exato apresentado foi baseado no problema de sequenciamento *Open Shop*, pois pela análise dos estudos considerados na revisão da literatura, verificou-se que este era o problema que mais se adaptava às restrições do caso proposto neste trabalho. O algoritmo proposto para resolução subótima dos problemas foi baseado na metaheurística *Simulated Annealing* (SA). A escolha desta metaheurística também foi um resultado da revisão da literatura, que permitiu identificar o SA como um dos algoritmos mais utilizados na resolução de problemas de programação de caminhões.

O modelo matemático proposto respeitou as condições impostas ao problema, como as restrições de janelas de tempo e precedência de atividades de descarregamento antes de carregamento. Entretanto, as resoluções exatas do modelo apresentaram limitações computacionais quando executadas pelos *softwares* de otimização LINGO e Gurobi.

Estas limitações já eram esperadas devido à classificação *NP-hard* dos problemas de programação de caminhões e foram a motivação para implementação

do algoritmo baseado na metaheurística *Simulated Annealing*. Pelos experimentos computacionais, o algoritmo proposto mostrou-se robusto ao atender as restrições do problema base e retornar soluções próximas às ótimas, com valores de GAP menores que 4% e dentro de tempos computacionais aceitáveis.

Ponderando-se estas considerações, o modelo exato apresentado para o problema de programação e sequenciamento de caminhões mostrou-se viável para problemas pequenos. Já o algoritmo proposto baseado na metaheurística *Simulated Annealing* pode ser utilizado para problemas maiores que não podem ser solucionados de maneira exata devido a limitações computacionais, e pode até ser considerado como uma ferramenta a ser utilizada pelas empresas para resolver problemas reais de sequenciamento e programação de veículos.

Pesquisas futuras podem explorar as limitações deste trabalho de modo a incluí-las no escopo do modelo matemático e tornar o problema mais completo e mais fiel às situações reais das empresas. Exemplos de limitações a serem analisadas são restrições de capacidade das docas e opção de operação de docas em paralelo. Além disso, propõe-se a aplicação de outras heurísticas ou metaheurísticas, como Algoritmo Genético e Evolução Diferencial.

REFERÊNCIAS

- AHKAMIRAAD, A.; WANG, Y. Capacitated and multiple cross-docked vehicle routing problem with pickup, delivery, and time windows. **Computers & Industrial Engineering**, Estados Unidos, v. 119, n. 76-84, 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.03.007>>. Acesso em: 25 outubro 2019.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. H. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier: ABREPRO, 2007.
- ASSADI, M. T.; BAGHERI, M. Differential evolution and Population-based simulated annealing for truck scheduling problem in multiple door cross-docking systems. **Computers & Industrial Engineering**, Irã, v. 96, n. 149-161, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2016.03.021>>. Acesso em: 25 outubro 2019.
- BAZGOSHA, A.; RANJBAR, M.; JAMILI, N. Scheduling of loading and unloading operations in a multi stations transshipment terminal with release date and inventory constraints. **Computers & Industrial Engineering**, v. 106, n. 20-31, 2017. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2017.01.023>>. Acesso em: 28 outubro 2019.
- BERGHMAN, L.; LEUS, R.; SPIEKSMAN, F.C.R. Optimal solutions for a dock assignment problem with trailer transportation. **Annals of Operations Research**, Bélgica, v. 213, n. 3-25, 2014. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s10479-011-0971-7>>. Acesso em: 25 outubro 2019.
- BODNAR, P.; KOSTER, R.; AZADEH, K. Scheduling trucks in a cross-dock with mixed service mode dock doors. **Transportation Science**, Estados Unidos, v. 51, n. 112-131, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1287/trsc.2015.0612>>. Acesso em: 30 outubro 2019.
- COTA, P.M.; GIMENEZ, B. M. R.; ARAÚJO, D. P. M.; NOGUEIRA, T. H.; SOUZA M. C.; RAVETTI, M. G. Time-indexed formulation and polynomial time heuristic for a multi-dock truck scheduling problem in a cross-docking centre. **Computers & Industrial Engineering**, Brazil, v.95, n. 135-143, 2016. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2016.03.001>>. Acesso em: 25 outubro 2019.
- DONDO, R.; CERDÁ, J. The heterogeneous vehicle routing and truck scheduling problem in a multi-door cross-dock system. **Computers & Industrial Engineering**, Argentina, v. 76, n. 42-62, 2015. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.02.003>>. Acesso em 25 outubro 2019.
- DRESCH, A; LACERDA, D. P.; ANTUNES JUNIOR, J. A. V. **Design Science Research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015.
- DULEBENETS, M. A. A Delayed Start Parallel Evolutionary Algorithm for just-in-time truck scheduling at a cross-docking facility. **International Journal of Production Economics**, Estados Unidos, v. 212, n. 236-258, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.02.017>>. Acesso em: 25 outubro 2019.
- FARD, S. S.; VAHDANI, B. Assignment and scheduling trucks in cross-docking system with energy consumption consideration and trucks queuing. **Journal of Cleaner Production**, Irã, v. 213, n. 21-41, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.106>>. Acesso em: 25 outubro 2019.
- FRANZIN, A.; STÜTZLE, T. Revisiting simulated annealing: A component-based analysis. **Computers and Operations Research**, Bélgica, v. 104, n. 191-206. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.12.015>>. Acesso em: 22 dezembro 2020.
- FUCHIGAMI, H. Y. Algoritmo simulated annealing para programação de flow shops paralelos proporcionais com tempos de setup. In: **Simpósio Brasileiro de PESQUISA OPERACIONAL**, 43., 2011, Ubatuba-SP. Disponível em: < <http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2011/pdf/88031.pdf>>. Acesso em: 15 dezembro 2020.

GELAREH, S.; MONEMI, R. N.; SEMET, F.; GONCALVES G. A branch-and-cut algorithm for the truck dock assignment problem with operational time constraints. **European Journal of Operational Research**, França, v.249, n. 1144-1152, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2015.09.049>>. Acesso em: 25 outubro 2019.

GIL, A.C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, P. Optimization by Simulated Annealing, **Science**, v. 220, n. 671-680, 1983. Disponível em: <<http://links.jstor.org/sici?sici=0036-8075%2819830513%293%3A220%3A4598%3C671%3A0BSA%3E2.0.CO%3B2-8>>. Acesso em 27 janeiro 2021.

LADIER, A.; ALPAN, G. Robust cross-dock scheduling with time windows. **Computers & Industrial Engineering**, França, v. 99, n. 16-28, 2016a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.09.008>>. Acesso em: 25 outubro 2019.

LADIER, A.; ALPAN, G. Cross-docking operations: Current research versus industry practice. **Omega**, França, v. 62, n. 145-162, 2016b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2015.09.006>>. Acesso em: 25 outubro 2019.

LIAO, T. W.; EGBELU, P. J.; CHANG, P. C. Simultaneous dock assignment and sequencing of inbound trucks under a fixed outbound truck schedule in multi-door cross docking operations. **Int. J. Production Economics**, Estados Unidos, v. 141, n. 212-229, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.03.037>>. Acesso em: 25 outubro 2019.

METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, A.W.; ROSENBLUTH, M.N.; TELLER, A. Equation of state calculations by fast computing machines. **J. Chem. Phys.**, v.21, n. 1087–1092, 1953. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.1699114>>. Acesso em: 27 janeiro 2021.

MOLAVI, D.; SHAHMARDAN, A.; SAJADIEH, M. S.; Truck scheduling in a cross docking systems with fixed due dates and shipment sorting. **Computers & Industrial Engineering**, Irã, v. 117, n. 29-40, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.01.009>>. Acesso em: 25 outubro 2019.

MOHTASHAMI, A.; Scheduling trucks in cross-docking systems with temporary storage and repetitive pattern for shipping trucks. **Applied Soft Computing**, Irã, v. 36, n. 468-486, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2015.07.021>>. Acesso em: 25 outubro 2019.

NADERI, B.; ZANDIEH, M. Modeling and scheduling no-wait open shop problems. **International Journal of Production Economics**, v. 158, n. 256-266, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.06.011>>. Acesso em: 10 junho 2020.

NAWAZ, M.; ENSCORE, E. E.; HAM, I. A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem. **Omega**, v.11, n.91-95, 1983. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0305-0483\(83\)90088-9](https://doi.org/10.1016/0305-0483(83)90088-9)>. Acesso em: 12 fevereiro 2021.

PENG, T.; ZHOU, B. Hybrid bi-objective gray wolf optimization algorithm for a truck scheduling problem in the automotive industry. **Applied Soft Computing Journal**, China, v. 81, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105513>>. Acesso em: 25 outubro 2019.

PINEDO, M. L. **Scheduling: Theory, Algorithms and Systems**. 5. ed. Nova York: Springer, 2016.

RAJABI, M.; SHIRAZI, M. Truck scheduling in a cross-dock system with multiple doors and uncertainty in availability of trucks. **Journal of Applied Environmental and Biological Sciences**, Irã, v. 6, n. 101-109, 2016. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/7cbd/6d89209315d905179f53155f7e90272880d2.pdf>>. Acesso em: 25 outubro 2019.

RAMESH, C.; KAMALAKANNAN, R.; KARTHIK, R.; PAVIN, C.; DHIVAHARAN, S. A lot streaming based flow shop scheduling problem using simulated annealing algorithm. **Materials Today**:

Proceedings, India, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.108>>. Acesso em: 01 fevereiro 2021.

RIJAL, A.; BIJVANK, M.; KOSTER, R. Integrated scheduling and assignment of trucks at unit-load cross-dock terminals with mixed service mode dock doors. **European Journal of Operational Research**, Holanda, v. 278, n. 752-771, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.04.028>>. Acesso em: 25 outubro 2019.

SERRANO, C.; DELORME, X.; DOLGUI, A. Scheduling of truck arrivals, truck departures and shop-floor operation in a cross-dock platform based on truck loading plans. **International Journal of Production Economics**, França, v. 194, n. 102-112, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.09.008>>. Acesso em: 25 outubro 2019.

SHAHMARDAN, A.; SAJADIEH, M.S. Truck Scheduling in A Multi-Door Cross-docking Center with Partial Unloading - Reinforcement Learning-Based Simulated Annealing Approaches. **Computers & Industrial Engineering**, Irã, v. 139, n. 106-134, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106134>>. Acesso em: 25 outubro 2019.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARLAND, C.; HARRISON, A.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 1 ed - 10 reimp. Atlas, 2006.

TADUMADZE, G.; BOYSEN, N.; EMDE, S.; WEIDINGER, F. Integrated truck and workforce scheduling to accelerate the unloading of trucks. **European Journal of Operational Research**, Alemanha, v. 278, n. 343-362, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.04.024>>. Acesso em: 25 outubro 2019.

TUBINO, D. F. **Planejamento e controle da produção: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

WIRTH, M.; EMDE, S. Scheduling trucks on factory premises. **Computers & Industrial Engineering**, Alemanha, v. 126, n. 175-186, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.09.023>>. Acesso em: 25 outubro 2019.